

# 基于动态负荷分配的直流微电网电压控制策略

肖宏飞<sup>1</sup>,黄锦锋<sup>2</sup>,陈鑫<sup>2</sup>,林艳艳<sup>1</sup>,吴晨曦<sup>2</sup>

(1. 杭州电子科技大学 信息工程学院,浙江 杭州 311305;2. 杭州电子科技大学 自动化学院,浙江 杭州 310018)

**摘要:**  $U-I$ 下垂控制具有良好的自适应性及扩展性,可用于直流微电网的电压控制及负荷分配。传统下垂控制存在难以兼顾稳态电压控制精度与负荷分配精度、下垂系数整定受限等问题。为此,提出了一种适用于下垂控制的二次电压控制策略,通过电压灵敏度整定下垂控制的电压参考值,实现直流母线电压的快速调节,提高系统的暂态响应速度;根据运行需求整定负荷分配系数,并更新下垂控制的电流参考值,在功率单元间实现所需比例的负荷分配。仿真结果验证了所提控制策略在负荷突变、下垂系数改变、分布式发电发生故障、通信中断等情形下的有效性及适应性。

**关键词:** 直流微电网;下垂控制;电压调节系数;动态负荷分配;二次电压控制;电压灵敏度

**中图分类号:** TM 761

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.epae.202105015

## 0 引言

分布式发电(DG)具有环境友好、安装灵活、兼容性强等优点,微电网作为DG的有效载体可实现与公用电网的联合运行。相较于交流微电网,直流微电网既不存在电压相位及频率控制问题,也不存在谐波及无功补偿问题,电能质量较容易控制<sup>[1-2]</sup>;同时,对于具有多电压等级需求的直流负荷而言,采用直流母线供电可避免冗余的能量变换环节,提高系统的运行效率<sup>[3]</sup>。

能量管理是微电网稳定、经济运行的有效手段<sup>[4]</sup>。直流微电网的能量管理基本分为集中式、分布式、分层式3类。集中式能量管理通过微电网中央控制器MGCC(MicroGrid Central Controller)对全局信息进行采集、传输并完成控制算法的实施<sup>[5]</sup>,其优点是系统协调性较好,可完成复杂系统的运行与调度任务,但较多地依赖于通信网络;分布式能量管理通过功率单元的控制器实现局部控制<sup>[6]</sup>,自治性较强,但难以实现复杂系统的全局优化运行;分层式能量管理则较好地融合了集中式能量管理与分布式能量管理的优点,上层系统级运行采用集中式控制以实现系统运行优化及能量管理,底层单元级运行采用分布式控制,既可接受上层指令完成既定的任务,也可在通信中断时根据本地信息实现独立运行<sup>[7]</sup>。

下垂控制具有良好的自适应性,适用于底层功率单元的电压控制及电流分配。系统级的二次调节

可修正下垂控制的运行参数,消除其一次调节遗留的直流母线电压偏差并改善电流分配。按照控制变量的类型,二次电压控制分为电压控制类、电流控制类、电压-电流混合控制类。电压控制类方法以直流母线电压恢复为切入点,通过在二次调节中引入电压补偿或电流补偿,以消除直流母线电压偏差并提高电流分配精度<sup>[8-9]</sup>。该类控制方法以消除直流母线电压偏差为主,功率单元间的电流分配效果稍逊。电流控制类方法从电流分配入手,通过修正下垂系数以重新分配负荷<sup>[10]</sup>。该类控制方法将下垂系数耦合为某些物理量的函数,通过物理量的变化实时校正下垂系数<sup>[11-12]</sup>,具有较高的电流分配精度。电压-电流混合控制类方法则融合了前2类控制方法的思想,同时进行电压参考值调节及下垂系数校正,以达到补偿电压、改善电流分配的目的<sup>[13]</sup>。混合控制类方法依赖于低速通信或相邻通信<sup>[14-15]</sup>,在通信良好的情况下可获得较好的电压控制及负荷分配效果。但现有混合控制类方法仍存在以下共性问题:①二次电压控制不适应容量任意配比的负荷分配,从而影响微电网运行的经济性及可靠性;②下垂系数的选取需要与线路阻抗匹配,甚至依赖于线路参数的设置,从而影响系统运行的灵活性。

为此,本文提出了一种适用于下垂控制的混合二次电压控制策略,在二次电压控制中引入电压调节系数及负荷分配系数,根据系统运行需求整定下垂控制的参数,以实现直流母线电压快速调节及动态负荷分配。

## 1 直流微电网的下垂控制分析

对于功率单元采用下垂控制的微电网而言,其简化模型<sup>[6]</sup>如图1所示,DG通过升压型单向功率变换器(Boost变换器)接入直流母线,负荷通过降压型单向变换器接入直流母线。图中, $L_n$ 、 $C_n$ 分别为功率

收稿日期:2020-12-14;修回日期:2021-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766201);浙江省教育厅科研项目(Y201738136)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U1766201) and the Scientific Research Project of Zhejiang Education Department(Y201738136)

单元  $n$  的 Boost 变换器的电感、电容 ( $n \in \tilde{N}$ ,  $\tilde{N} = \{1, 2, \dots, N\}$  为采用下垂控制的功率单元集合,  $N$  为功率单元的数量);  $r_n, L_{r,n}$  分别为功率单元  $n$  连接至直流母线的线路电阻、等值电感;  $I_n$  为功率单元  $n$  的输出电流;  $I_{dc}$  为负荷电流;  $R_{eq}, L_{eq}$  分别为直流母线负荷等效电阻、电感;  $L_R, C_R$  分别为降压型单向变换器的等值电感、稳压电容;  $C_{dc}$  为直流母线稳压电容。

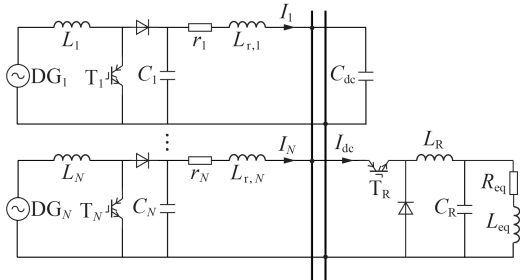


图1 直流微电网的简化模型

Fig.1 Simplified model of DC microgrid

采用  $U$ - $I$  下垂控制的功率单元的输出特性可表示为:

$$U_n = U_{n,ref} - k_n I_n \quad (1)$$

其中,  $U_n$  为功率单元  $n$  变换器出口处的电压;  $U_{n,ref}$  为功率单元  $n$  下垂控制的电压参考值;  $k_n$  为功率单元  $n$  的下垂系数。稳态运行时的功率单元可等效为一个理想电压源与一个电阻串联, 如图2所示。图中,  $U_{dc}$  为直流母线电压。

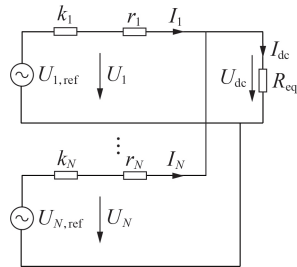


图2 基于下垂控制的直流微电网等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of DC microgrid based on droop control

结合式(1)及图2可得功率单元  $n$  的输出电流为:

$$I_n = \frac{U_{n,ref} - U_{dc}}{r_n + k_n} \quad n \in \tilde{N} \quad (2)$$

若希望变换器的输出功率与其容量成正比, 则需将各功率单元下垂控制的电压参考值设置为相等, 同时保持下垂系数与功率单元的额定输出电流成反比且远大于线路电阻, 即:

$$\chi = \{U_{n,ref} = c_U \& k_n \propto 1/I_{n,rat} \& k_n \gg r_n\} \quad (3)$$

其中,  $\chi$  为功率单元需满足条件的集合;  $c_U$  为一个正常数;  $I_{n,rat}$  为功率单元  $n$  的额定输出电流。此时, 输出电流可按额定输出电流的比例分配, 即:

$$\frac{I_i}{I_j} = \frac{I_{i,rat}}{I_{j,rat}} = \frac{k_j}{k_i} \quad i, j \in \tilde{N} \text{ 且 } i \neq j \quad (4)$$

理论上按照式(1)和式(3)设计的下垂控制器可实现输出电流的等比例分配。但在实际运行中存在以下问题。

1) 下垂系数的整定范围受限。过大的下垂系数将导致 DG 母线电压剧烈波动, 而过小的下垂系数则不足以克服线路阻抗不匹配所导致的电流分配误差。电压控制精度与电流分配精度间的均衡需求制约了下垂系数的整定。而下垂系数被固化为与功率单元容量相关的数值, 进一步加剧了功率单元参数整定的壁垒。

2) 系统运行灵活性降低。当系统负荷按功率单元的容量比例进行分配时, 电源的输出功率被抑制在较小的可调度区间内, 在正常状态下不利于系统的经济运行, 在紧急状态下不利于备用容量的充分利用, 极大地制约了微电网的运行灵活性。

## 2 基于下垂控制的二次电压控制策略

针对上述问题, 本文提出了一种混合型二次电压控制策略, 如图3所示。图中,  $P_{n,rat}$ 、 $P_{n,bas}$ 、 $P_{n,res}$  分别为功率单元  $n$  的额定功率、基点经济功率及备用容量;  $P_{Load}$  为系统的总负荷;  $\alpha_n$ 、 $\beta_n$  分别为功率单元  $n$  的负荷分配系数、电压调节系数。二次电压控制主要包括参数整定、电压/电流控制2个模块, 参数整定模块根据当前系统的运行状态确定电压/电流控制模块所需的实时调节参数, 电压/电流控制模块根据新的调节参数整定下垂控制的参考值。

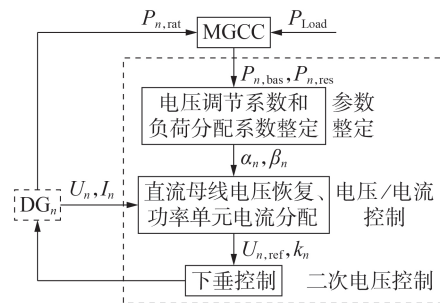


图3 二次电压控制策略框图

Fig.3 Block diagram of secondary voltage control strategy

### 2.1 参数整定

对于二次电压控制的参数整定而言, 首先需明确功率单元集合及各功率单元的参与度, 即参与二次电压控制的功率单元及其具体的调节量。

功率单元集合的确定需考虑 DG 单元的容量限制、DG 单元发生故障、线路容量限制等因素。在每一轮的二次电压控制中, 若根据初步设定的负荷分配系数预估的功率大于功率单元的额定功率, 表明

该运行状态下不能达到预期的负荷分配效果,需将该功率单元的功率整定为额定功率,并将其从功率单元集合中删除;在新的功率单元集合中重新设置负荷分配系数,直至完成当前负荷分配。

对于功率单元的参与度,本文通过电压调节和负荷分配 2 个维度进行量化。当直流母线不安装调压装置时,依靠各功率单元的调节能力实现电压的间接控制。设直流母线电压偏差  $\Delta U_{dc}$  为:

$$\Delta U_{dc} = U_{dc,ref} - U_{dc} \quad (5)$$

其中,  $U_{dc,ref}$  为直流母线电压参考值。当  $\Delta U_{dc}$  大于阈值时,启动二次电压控制程序。直流母线电压偏差由参与调压的功率单元共同承担,即:

$$\Delta U_{dc} = \sum_n \Delta U_{dc,n} \quad (6)$$

其中,  $\Delta U_{dc,n}$  为功率单元  $n$  承担的直流母线电压调节量。在开放的市场环境下,可根据提前签署的协议在实时运行中对用户拥有的可调度电源进行调度。对于能够参与二次调节的功率单元而言,其参与程度由 MGCC 通过运行优化或运行状态确定。则在二次电压控制中各功率单元承担的直流母线电压调节量为:

$$\Delta U_{dc,n} = \beta_n \Delta U_{dc} \quad (7)$$

其中,电压调节系数  $\beta_n \in [0, 1]$ ,且满足  $\sum_n \beta_n = 1$ 。当  $\beta_n = 0$  时,表明功率单元  $n$  不参与二次电压控制。最便捷的电压调节系数设置方式为:令  $\beta_n = 1/N$ ,即将各功率单元的电压调节系数设置为相等。

对于负荷分配而言,应结合微电网的运行状态予以考虑。当微电网处于过载或电压越限的紧急状态时,应以迅速恢复电压为主要目的,此时应调用一切备用容量进行调压,甚至采取减载手段以保证系统运行的稳定性。当系统处于正常运行状态时,既可按功率单元的容量比例设定负荷分配系数,以保持运行中的功率单元具有相同的设备利用率;也可按基点经济功率进行分配,强调微电网运行的经济性;或采用任意指定比例等方式进行负荷分配系数设定。负荷分配系数的整定流程如图 4 所示。图中,  $P_{n,set}$  为功率单元  $n$  的设定调节功率;  $\delta_U$  为二次电压控制启动阈值。

在各种负荷分配策略下,要求功率单元均可按设定的负荷分配系数输出电流,即:

$$I_n = \alpha_n I_{dc} \quad (8)$$

其中,负荷分配系数  $\alpha_n \in [0, 1]$ ,且满足  $\sum_n \alpha_n = 1$ 。

## 2.2 电压 / 电流控制

对于具有图 2 所示等值电路的直流微电网而言,有:

$$\frac{U_{1,ref} - U_{dc}}{r_1 + k_1} + \frac{U_{2,ref} - U_{dc}}{r_2 + k_2} + \dots + \frac{U_{N,ref} - U_{dc}}{r_N + k_N} = \frac{U_{dc}}{R_{eq}} \quad (9)$$

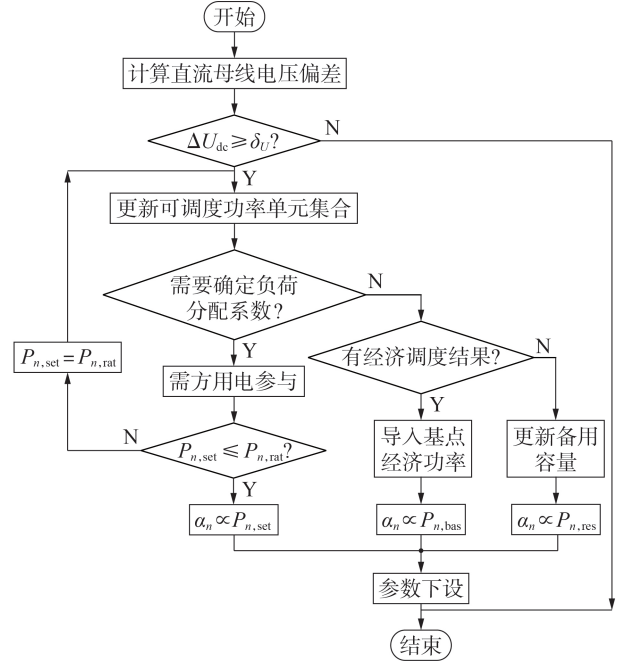


图 4 负荷分配系数的确定流程图

Fig.4 Flowchart of determining load allocation coefficient

进一步可得直流母线电压为:

$$U_{dc} = \frac{\sum_n U_{n,ref} \prod_{j \neq n} (r_j + k_j) / \prod_j (r_j + k_j)}{\frac{1}{R_{eq}} + \sum_n \prod_{j \neq n} (r_j + k_j) / \prod_j (r_j + k_j)} \quad (10)$$

可以发现,影响直流母线电压的因素包括下垂控制的电压参考值及下垂系数、等效负荷电阻、线路电阻。对于给定的系统结构,电源至直流母线的距离是确定的,则线路载面积及长度是确定的,线路电阻不宜变动。通过引入虚拟阻抗可以改变等值输出阻抗,但会增加线路的电压降落。因此,调节直流母线电压可从下垂系数及电压参考值方面考虑。但下垂系数的剧烈变化将影响稳态电压偏差。因此最有效的调节手段是整定下垂控制的电压参考值,辅助手段为调节下垂系数。

设各 DG 及变换器参数、线路电阻及直流母线等值负荷均已知,可由式(10)计算直流母线电压对下垂控制电压参考值的一阶偏导,如式(11)所示。

$$\frac{\partial U_{dc}}{\partial U_{n,ref}} = \frac{1/(r_n + k_n)}{\frac{1}{R_{eq}} + \sum_n \prod_{j \neq n} (r_j + k_j) / \prod_j (r_j + k_j)} \quad (11)$$

定义  $S_n = \partial U_{dc} / \partial U_{n,ref}$  为直流母线电压对下垂控制电压参考值的灵敏度(下文简称灵敏度)。对于分配给功率单元  $n$  的调压任务  $\Delta U_{dc,n}$ ,可根据灵敏度快速计算下垂控制的电压参考值增量  $\Delta U_{n,ref}$ ,如式(12)所示。

$$\Delta U_{n,ref} = \Delta U_{dc,n} / S_n \quad (12)$$

相应地,下垂控制方程应修正为:

$$U_n = [U_{n,\text{ref}} + (U_{\text{dc},\text{ref}} - U_{\text{dc}})\beta_n/S_n] - I_n k_n \quad (13)$$

考虑到线路电阻上的电压降落,则有:

$$U_{n,\text{ref}} + \Delta U_{n,\text{ref}} = U_{\text{dc}} + (k_n + r_n)I_n \quad (14)$$

$$\Delta U_{n,\text{ref}} = (U_{\text{dc},\text{ref}} - U_{\text{dc}})\beta_n/S_n \quad (15)$$

按照式(13)进行电压补偿后,可将直流母线电压恢复至参考值,若功率单元的输出电流与设定比例不一致,还需进行电流分配调节。

对于系统当前的负荷电流 $I_{\text{dc}}$ ,要使各功率单元按设定的系数进行负荷分配,则各功率单元的电流应保持为 $\alpha_n I_{\text{dc}}$ 。为此,下垂控制方程应修正为:

$$U_{n,\text{ref}} + \Delta U_{n,\text{ref}} = U_{\text{dc}} + (k_n + r_n)\alpha_n I_{\text{dc}} \quad (16)$$

考虑到直流母线的等值负荷电阻,可得:

$$U_{n,\text{ref}} + \Delta U_{n,\text{ref}} = U_{\text{dc}} [1 + (k_n + r_n)\alpha_n/R_{\text{eq}}] \quad (17)$$

结合式(15)~(17)可得二次电压控制策略框图如图5所示。

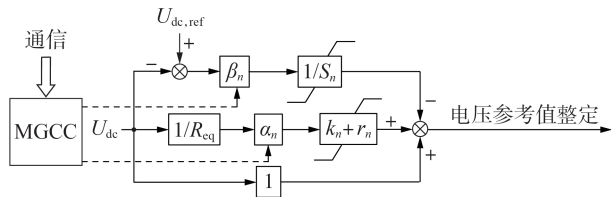


图5 二次电压控制策略框图

Fig.5 Block diagram of secondary voltage control strategy

结合图1所示微电网结构及下垂控制的一次调节,可得功率单元的控制策略框图如图6所示。图中, $d_n$ 为脉冲调制信号。二次电压控制功能由MGCC完成,电压参考值增量信号经低速通信网络发送给至功率单元的下垂控制器,调节其输出功率。

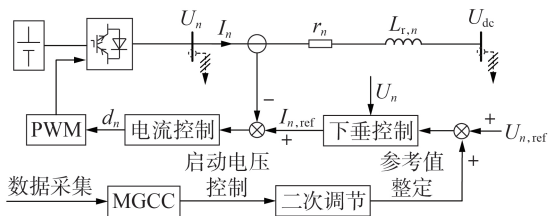


图6 功率单元的控制策略框图

Fig.6 Block diagram of control strategy for power unit

### 3 直流微电网的小信号模型

根据图1建立微电网的小信号模型。其中,电源采用理想直流电压源,经DC/DC变换器接入微电网;负荷为恒阻型,直接接入直流母线。此类源荷在小扰动下不影响系统稳定性。现对DC/DC变换器、直流母线及下垂控制器进行小信号建模。

根据开关导通及关断时的等效电路,在忽略开关内阻及损耗的情况下,可得Boost变换器的平均开

关模型为:

$$\begin{cases} C_n dU_n/dt = (1-d_n)I_{L_n} - I_n \\ L_n dI_{L_n}/dt = U_{s,n} - (1-d_n)U_n \\ L_{r,n} dI_n/dt = U_n - r_n I_n - U_{\text{dc}} \end{cases} \quad (18)$$

其中, $U_{s,n}$ 、 $I_{L_n}$ 分别为功率单元 $n$ 的Boost变换器等效输入电压、电感电流。

直流母线并联稳压电容的微分方程为:

$$C_{\text{dc}} dU_{\text{dc}}/dt = \sum_{n=1}^N I_n - I_{\text{dc}} \quad (19)$$

各变换器采用 $U-I$ 下垂控制作为外环控制,以输出电流作为内环反馈控制量,相应的下垂控制小信号模型为:

$$\begin{cases} db_n/dt = \frac{1}{K_{I,n}} \left( \frac{U_{n,\text{ref}} - U_n}{k_n} - I_n \right) \\ d_n = \frac{1}{v_{m,n}} \left[ K_{P,n} \left( \frac{U_{n,\text{ref}} - U_n}{k_n} - U_n \right) + b_n \right] \end{cases} \quad (20)$$

其中, $v_{m,n}$ 为功率单元 $n$ 的锯齿波峰值; $b_n$ 为功率单元 $n$ 的电流环PI控制器的积分项输出; $K_{P,n}$ 、 $K_{I,n}$ 分别为PI控制器的比例、积分参数。

将式(18)~(20)在稳态运行点附近线性化,可得直流微电网小信号模型为:

$$\Delta \dot{X} = A_{\text{sys}} \Delta X \quad (21)$$

其中, $\Delta X = [\Delta U_1, \Delta I_{L_1}, \Delta I_1, \Delta b_1, \dots, \Delta U_N, \Delta I_{L_N}, \Delta I_N, \Delta b_N, U_{\text{dc}}]^T$ , $\Delta$ 表示相应变量的变化量。对于给定拓扑结构及运行状态的微电网而言,可根据矩阵 $A_{\text{sys}}$ 的特征根分布情况判断其稳定性。

## 4 算例分析

### 4.1 所提控制策略的有效性验证

在PSCAD环境下构建图1所示微电网系统。系统中包含2个直流源,均以理想电压源模拟,经Boost变换器、低压电缆接入直流母线;各功率单元采用下垂控制。为了重点分析所提控制策略对功率单元的调配效果,本文以不具备调压及功率控制功能的恒阻性负荷接入直流母线。

在进行系统参数设计时,为了使系统保持稳定,令系统闭环极点分布于左半平面且主导极点远离虚轴、靠近负实轴。在此基础上保留一定的裕量,使得参数发生变化时系统仍能稳定工作。据此设计系统参数如附录A表A1所示。取电压基准值为48V,电流基准值为3A。一次电压调节即刻启动,二次电压调节周期设置为5s。分别对负荷突变、下垂系数变化、负荷分配系数变化的情形进行仿真,验证所提二次电压控制策略的有效性。

1)情形1:负荷突变。

情形1的仿真结果如图7所示。图中,直流

母线电压、 $I_1$ 、 $I_2$ 均为标么值,后同。在初始运行状态 ( $[0, 4)$  s)下,负荷分配系数设为 $\alpha_1=0.667$ 、 $\alpha_2=0.333$ ,直流母线电压为1.0 p.u.,功率单元1、2的DG输出电流分别为0.443、0.225 p.u.;4 s时直流母线负荷由24  $\Omega$ 变至12  $\Omega$ ,在本轮二次电压控制周期内MGCC未整定新的下垂控制参考值,致使运行状态发生变化时直流母线电压发生跌落,且传统控制方法下的电压跌落更为严重;(4,5) s内各功率单元的输出电流与设定的负荷分配系数发生分离;5 s时启动新一轮二次电压控制。

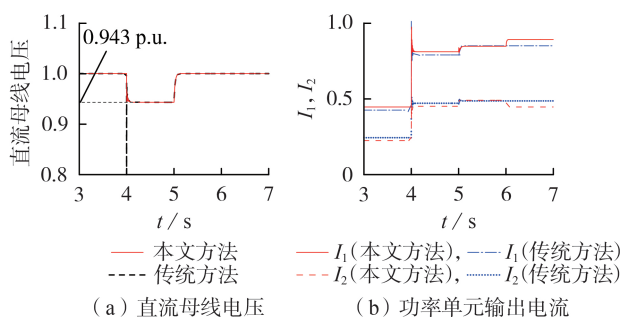


图 7 情形 1 的仿真结果

Fig.7 Simulative results of Condition 1

为了验证电压恢复与负荷分配的调节效果,仿真中将本文所提控制策略分两阶段实施。阶段1为[5,6] s,进行电压恢复,通过电压灵敏度计算下垂控制的电压参考值增量,更新电压参考值,该过程可将直流母线电压迅速恢复至1.0 p.u.,此时系统总功率满足负荷需求。由于阶段1只对直流母线电压进行校正,各功率单元的实际输出电流与设定的负荷分配系数不一致。在阶段2((6,7] s)进行电流调节,由图7可知在该调节过程中2个功率单元的输出电流总和不变,负荷在功率单元间被重新分配,功率单元1、2的输出电流分别为0.890、0.445 p.u.,与设定的负荷分配系数一致。由附录A表A1可知,功率单元1、2的DG的容量比为1.75:1,传统的二次电压调节方法仅能按照功率单元的容量比例分配负荷,而本文所提方法可以按照设定的负荷分配系数进行负荷分配,有助于提高系统运行的灵活性。

由于在电压/电流控制环节中采用的是基于灵敏度的直接电压控制,而非基于控制变量偏差的积分控制,本文二次电压控制方法的暂态过程得以显著缩短,提高了系统的暂态响应速度。

2)情形2:下垂系数改变。

恢复系统初始运行条件重新进行仿真。4 s时功率单元1的下垂系数由1 V/A变为3 V/A,功率单元2的下垂系数由2 V/A变为5 V/A,5 s和6 s分两阶段进行二次电压调节,仿真结果如图8所示。

由图8可知,改变下垂系数会导致系统运行状态发生显著变化,直流母线电压偏离参考值,功率单

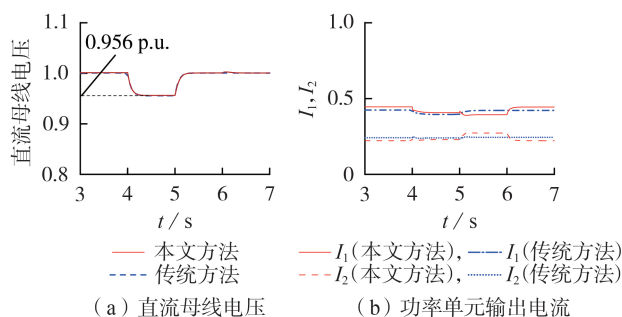


图 8 情形 2 的仿真结果

Fig.8 Simulative results of Condition 2

元的输出电流与设定的负荷分配系数发生分离。采用本文所提电压控制策略,经阶段1调节后可将直流母线电压恢复至1.0 p.u.,经阶段2调节后将功率单元输出电流的比例恢复至设定的负荷分配系数。可见,当下垂系数因运行需要而发生改变时,采用本文所提二次电压控制策略仍可维持直流母线电压稳定,并保持负荷的精确分配;而传统的二次电压控制方法仅能按功率单元的容量比例分配负荷。

3)情形3:负荷分配系数改变。

定义功率单元 $n$ 输出电流的相对误差 $\gamma_n$ 为:

$$\gamma_n = \frac{I_n / \sum_j I_j - \alpha_n}{\alpha_n} \times 100\%$$

在不同的负荷分配系数下进行仿真,可得功率单元输出电流的相对误差如表1所示。 $\alpha_2$ 与 $\alpha_1$ 同步变化,且保持 $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$ 。由表1可知,当负荷分配系数在较大的区间内变化时,功率单元输出电流的相对误差始终较小,说明采用本文所提二次电压控制策略可有效实现负荷分配。

表 1 不同负荷分配系数下功率单元输出电流的相对误差

Table 1 Relevant error of power unit output current under different load allocation coefficients

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\gamma_1 / \%$	$\gamma_2 / \%$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\gamma_1 / \%$	$\gamma_2 / \%$
0.1	0.9	2.85	-0.39	0.6	0.4	-1.29	1.74
0.2	0.8	2.57	-0.52	0.7	0.3	0.58	-1.69
0.3	0.7	-1.42	0.67	0.8	0.2	0.82	-3.72
0.4	0.6	1.24	-0.86	0.9	0.1	0.21	-2.20
0.5	0.5	2.26	-2.25				

4.2 所提控制策略的适应性分析

构建一个含有4台DG的直流微电网系统,拓扑结构如附录A图A1所示,用于验证本文所提控制策略在通信中断、DG发生故障等情况下的适应性。仿真中取电压、电流基准值分别为200 V、10 A,一次电压调节即刻启动,二次电压调节周期为2 s,电压调节与负荷分配同步进行。各元件参数见附录A表A2。

1)通信中断。

设3 s时DG<sub>4</sub>与MGCC的通信发生中断,4 s时启动新一轮的二次电压调节,仿真结果如图9所示。图中 $I_3, I_4$ 为标么值,后同。

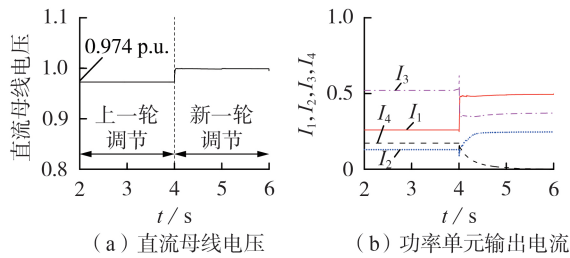


图9 通信中断时的仿真结果

Fig.9 Simulative results with communication interruption

由图可知,在[3,4) s内,功率单元4不能接收MGCC的指令,只能自适应进行一次调节。由于下垂控制器的参考值维持上一轮二次电压调节周期内的数值,且系统负荷及其他运行参数未发生变化,使各DG的输出电流及直流母线电压在[3,4) s内未发生变化。在[4,6) s内,MGCC启动新一轮二次电压调节,将DG<sub>4</sub>作为不可调度电源,仅在其他3个可调度功率单元间进行负荷分配,负荷分配系数按照2.1节所述方法进行设置。为了清晰起见,按照功率单元的容量比例设置负荷分配系数,即 $\alpha_1=0.444, \alpha_2=0.222, \alpha_3=0.333$ 。由图9可知,在新一轮二次电压调节周期内,各功率单元输出电流的比例与设定的负荷分配系数一致,且直流母线电压恢复至参考值附近。由于各功率单元的容量充足,3台正常运行的DG承担了系统的全部负荷,而DG<sub>4</sub>基本不输出功率,处于空载运行状态。

#### 2) 功率单元发生故障。

设7 s时功率单元4发生故障而退出运行,8 s时启动新一轮二次电压调节,仿真结果如图10所示。

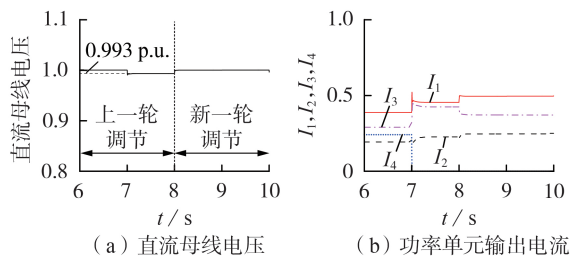


图10 功率单元4发生故障时的仿真结果

Fig.10 Simulative results with failure of power unit 4

由图可知,在[7,8) s内,系统维持上一轮电压二次调节参数不变,4个功率单元的负荷分配系数分别为0.348、0.174、0.269、0.217。但功率单元4只能接收信号而无法输出功率,其他3个正常功率单元根据新一轮二次电压调节的负荷分配系数进行自适应一次调节,输出功率大幅增加但不能满足系统负荷需求,直流母线电压无法回升至参考值。在该

阶段,系统的运行状态发生变化而二次电压调节尚未根据新的运行参数整定功率单元的下垂控制参考值,导致3个功率单元的输出电流比例失配。在[8,10) s内启动新一轮二次电压调节,MGCC在3个可调度功率单元间重新进行负荷分配。按照各功率单元的容量比例设置负荷分配系数,即 $\alpha_1=0.444, \alpha_2=0.222, \alpha_3=0.333$ 。可以发现,在新一轮二次电压调节周期内,正常运行功率单元的输出电流比例与设定的负荷分配系数一致,系统功率重新得到平衡,直流母线电压恢复至参考值。

若二次电压调节在扰动发生后即刻启动,则不会出现短时电流失配及直流母线电压跌落的情形。且直流微电网功率单元的时间常数小,响应速度较快,二次电压调节具备在较短周期内完成的客观条件。但从电力系统运行规律来看,二次电压调节的目的是定期恢复一次电压调节遗留的偏差,其周期通常大于一次调节的周期。本文设置的二次电压调节的周期是为了演示及验证所提控制策略的适应性,在实际运行中可根据电力系统的运行规律及微电网的运行需求进行整定。

## 5 结论

本文对直流微电网的电压控制策略进行了研究,提出了基于动态负荷分配的二次电压控制策略,可实现直流母线电压的快速调节及动态负荷分配。所提控制策略在较宽的范围内设置下垂系数,不受变换器容量配比约束,从而增加了系统运行的灵活性;同时功率单元的负荷分配可按运行需求设定,不受线路阻抗与下垂系数匹配度的影响,提高了系统运行的经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] CHEN D, XU L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1897-1905.
- [2] DRAGIČEVIĆ T, LU X N, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids - part II: a review of power architectures, applications, and standardization issues [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3528-3549.
- [3] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [4] GU Yunjie, XIANG Xin, LI Wuhua, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [5] JIANG W, FAHIMI B. Active current sharing and source management in fuel cell-battery hybrid power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 752-761.
- [6] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述

- [J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):72-84,344.  
ZHU Shanshan,WANG Fei,GUO Hui,et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(1):72-84,344.
- [7] BIDRAM A,DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2012,3(4):1963-1976.
- [8] 刘一琦,王建曌,傅裕,等. 直流微电网中不同网络结构的负荷功率分配精度研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):53-59.  
LIU Yiqi,WANG Jianze,FU Yu,et al. Load power sharing accuracy for different network configurations of DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):53-59.
- [9] ANAND S,FERNANDES B G,GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4):1900-1913.
- [10] 林嘉伟,王志新,张永. 独立直流微电网中考虑不同容量的分布式储能系统能量控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):139-146.  
LIN Jiawei,WANG Zhixin,ZHANG Yong. Energy control strategy of distributed energy storage system considering different capacities in isolated DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):139-146.
- [11] 于明,王毅,李永刚. 基于预测方法的直流微网混合储能虚拟惯性控制[J]. 电网技术,2017,41(5):1526-1532.  
YU Ming,WANG Yi,LI Yonggang. Virtual inertia control of hybrid energy storage in DC microgrid based on predictive method[J]. Power System Technology,2017,41(5):1526-1532.
- [12] 吕振宇,吴在军,窦晓波,等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4397-4407.  
LÜ Zhenyu,WU Zaijun,DOU Xiaobo,et al. An adaptive droop control for the islanded DC microgrid based on discrete consensus algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(17):4397-4407.
- [13] 米阳,吴彦伟,纪宏澎,等. 基于多组储能动态调节的独立直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):170-176.  
MI Yang,WU Yanwei,JI Hongpeng,et al. Coordinative control based on dynamic load allocation among multiple energy storages for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(5):170-176.
- [14] 顾伟,薛帅,王勇,等. 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制[J]. 电力系统自动化,2016,40(24):49-55,84.  
GU Wei,XUE Shuai,WANG Yong,et al. Finite-time consensus based distributed cooperative control for DC microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(24):49-55,84.
- [15] 李祥山,杨晓东,张有兵,等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):198-204.  
LI Xiangshan,YANG Xiaodong,ZHANG Youbing,et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(1):198-204.

#### 作者简介:



肖宏飞

肖宏飞(1976—),女,辽宁阜新人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为分布式能源应用技术(**E-mail**:xiaohf@hdu.edu.cn);  
黄锦锋(1996—),男,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为微电网运行与控制(**E-mail**:1809422943@qq.com);

陈鑫(1995—),男,浙江温州人,硕士,主要研究方向为电力系统优化(**E-mail**:405086990@qq.com);

林艳艳(1990—),女,浙江台州人,硕士,研究方向为分布式发电(**E-mail**:linyanyan@hdu.edu.cn);

吴晨曦(1978—),女,河北唐山人,副教授,博士,研究方向为并网风力发电技术(**E-mail**:wuchenxi@hdu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

## Voltage control strategy of DC microgrid based on dynamic load allocation

XIAO Hongfei<sup>1</sup>,HUANG Jinfeng<sup>2</sup>,CHEN Xin<sup>2</sup>,LIN Yanyan<sup>1</sup>,WU Chenxi<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 311305, China;

2. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:**  $U-I$  droop control has good adaptability and expansibility, and can be used in voltage control and load distribution of DC microgrid. Traditional droop control is difficult to balance the accuracy of steady-state voltage control with the accuracy of load distribution and its droop coefficient setting is limited. Therefore, a secondary voltage control strategy suitable for droop control is proposed. By setting the voltage reference value of droop control through voltage sensitivity, the DC bus voltage can be regulated quickly and the transient response speed of the system is improved. The load distribution coefficient is set according to the operation requirements, and the current reference value of droop control is updated to realize the required proportional load distribution among power units. Simulative results verify the effectiveness and adaptability of the proposed control strategy in the case of load mutation, droop coefficient change, distributed generation failure, communication interruption, and so on.

**Key words:** DC microgrid; droop control; voltage regulation coefficient; dynamic load distribution; secondary voltage control; voltage sensitivity

# 附录 A

表 A1 微电网系统参数  
Table A1 Parameters of microgrid system

单元	参数	取值	单元	参数	取值
Boost 变换器	$L_1/\text{mH}$	0.40	下垂控制器	$k_1/(\text{V}\cdot\text{A}^{-1})$	1.0
	$L_2/\text{mH}$	0.14		$k_2/(\text{V}\cdot\text{A}^{-1})$	2.0
	$C_1/\text{mF}$	0.78		$U_{1,\text{ref}}/\text{V}$	48
	$C_2/\text{mF}$	1.10		$U_{2,\text{ref}}/\text{V}$	48
电源	$U_{s1}/\text{V}$	24	$U_{\text{min}}/\text{V}$	43	
	$U_{s2}/\text{V}$	12	$U_{\text{max}}/\text{V}$	53	
	$P_{1,N}/\text{kW}$	0.35	线路	$r_1/\Omega$	1.5
	$P_{2,N}/\text{kW}$	0.20		$r_2/\Omega$	2.0

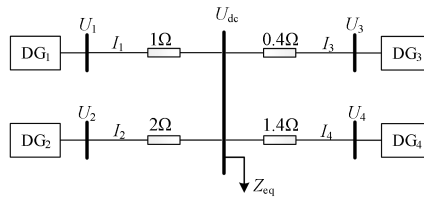


图 A1 微电网系统的拓扑结构  
Fig.A1 Topology structure of microgrid system

表 A2 微电网系统参数  
Table A2 Parameters of microgrid system

功率单元	换流器容量/kW	下垂系数/ $(\text{V}\cdot\text{A}^{-1})$	电源电压/V	功率单元	换流器容量/kW	下垂系数/ $(\text{V}\cdot\text{A}^{-1})$	电源电压/V
1	2.0	1.0	96	3	1.5	0.6	72
2	1.0	2.0	48	4	1.25	1.6	60