

# 多储能直流微电网的分布式控制

朱晓荣<sup>1</sup>, 蔡 杰<sup>1</sup>

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北保定 071003)

## Distributed Control Strategy for the Battery-based DC Microgrid

ZHU Xiaorong<sup>1</sup>, CAI Jie<sup>1</sup>

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**摘 要:**下垂控制在直流微网中的应用越来越广泛。但是下垂特性以及直流母线电阻的存在,使得节点电压偏离额定值且影响系统的负荷分配。为充分发挥直流微电网中储能系统的作用,本文提出了多储能系统直流微电网的分布式控制策略。该控制策略在传统 V-I 下垂控制策略的基础上加入了平均电压控制环节和功率协调控制环节。两环节通过一致性算法仅仅需要交换相邻两节点的信息,构建一个稀疏的信息交流网络,就能补偿下垂控制造成的电压偏移,且负荷能够按照不同储能系统的荷电状态来分配。针对上述所提的控制策略,本文首先对含两储能系统的直流微电网进行了小干扰稳定性分析。然后在 MATLAB/SIMULINK 中搭建了含三储能系统的直流微电网模型,通过时域仿真验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 储能系统; 直流微电网; 下垂控制; 分布式控制

**Abstract:** Droop control have been widely applied in DC microgrid. However, it fails to provide regulated rated voltage and proportional load distribution due to the droop characteristics and the transmission line resistance. In order to take advantage of the dispersed energy storage units in the DC microgrid, a distributed control strategy is proposed in this paper. Average voltage control and power coordination are used in the distributed coordination control segment based on traditional V-I droop control strategy. According to the proposed control strategy, the information is exchanged between adjacent nodes through the consensus algorithm, a sparse information communication network is built to compensate voltage offset caused by droop control, and to distribute load according to the SOC of the energy storage system. Firstly, the small-signal stability of DC micro-grid with two energy storage system is analyzed. Then another model of DC micro-grid with three energy storage system is built in MATLAB/SIMULINK, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

**Keywords:** energy storage; DC microgrid; droop control;

distributed control

## 0 引 言

作为集中式发电的有效补充,分布式发电技术正日趋走向成熟。微电网对分布式电源的有效管理,不仅最大限度地利用了可再生能源,更实现了分布式电源的“即插即用”<sup>[1-2]</sup>。目前,微电网的研究主要集中于交流微网方面,但是,随着大量直流微源的出现,以及负荷侧对直流功率需求的提高,直流微电网逐渐得到了人们的重视<sup>[3-4]</sup>。相对于交流微网,直流微网不需要对电压的相位和频率进行跟踪,控制简单,损耗较小,容易扩展,更适合分布式电源和负载的接入<sup>[5]</sup>。考虑到传统直流微网公共直流母线电阻的存在,直流微电网可看成为多端口的直流换流器系统,如图 1 所示。

对于多端口直流微电网来说,由于直流母线电阻的存在,使得各个节点电压由于下垂控制中电压参考值以及下垂系数的不同而不同,负荷不能按照传统意义上根据下垂控制输出的虚拟阻抗来分配,负荷分配的精度下降。控制系统平均电压,使直流微网各个节点电压恢复至本地节点电压参考值,避免了下垂控制时使电压偏移额定值。另外,将蓄电池荷电状态作为另一个控制目标,引入功率控制,能够平衡蓄电池荷电状态,提高蓄电池使用效率和使用寿命<sup>[6-8]</sup>。

文献 [9-10] 均通过模糊控制理论,根据不同储能系统的荷电状态对各储能中的下垂控制进行改进,实现不同储能单元间负荷功率的合理分配。然而模糊控制需要实时计算所有储能单元的剩余能量的平均值。文献 [11] 针对单独直流微电网的多

储能系统, 设置下垂系数和储能单元 SOC 的  $n$  次幂成反比, 实现对 SOC 和输出功率均衡速率的调整。文献 [12-13] 针对直流微电网的第二三次控制, 均采用集中式控制方法, 切断任何一条通信通道, 均会导致整个通信系统的通信失败。文献 [14-16] 针对传统下垂控制的不足以及考虑多直流变流器接入公共直流母线时线路电阻的影响, 提出了直流微网群的分布式控制, 消除了由于下垂控制造成的电压偏差, 并使得负载按照变换器容量进行分配。但是, 对于储能型直流微网来说, 仅仅根据容量来进行分配负荷会造成各储能系统荷电状态分布出现不平衡, 影响蓄电池的使用寿命。

本文综合考虑了系统平均电压以及蓄电池的荷电状态, 提出了多储能直流微网的分布式控制。本文首先对所提分布式控制做了详细的介绍。然后在此控制的基础上, 针对含两储能系统的直流微电网, 通过其小干扰模型, 分析了其稳定性。最后, 通过 MATLAB/SIMULINK 搭建了含三储能系统直流微电网模型, 验证了此控制策略的有效性。

## 1 直流微电网构成及其分布式控制

### 1.1 多端口直流微电网构成

多端口直流微电网的典型结构如图 1 所示。

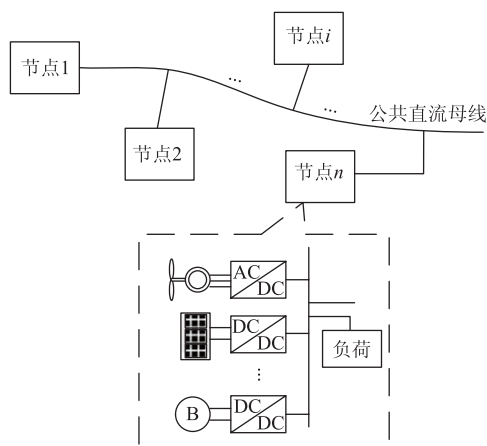


图 1 多端口直流微电网结构示意图

考虑到直流微电网公共直流母线的电阻, 传统直流微电网可以看成多端口的直流换流器系统。图 1 即为多端口直流微电网结构示意图。从图 1 可以看出, 每个节点可由一个或多个直流换流器组成, 其中每个节点可包含各种分布式能源、储能系统或者负荷中的一个或多个。由于像风机以及光伏

等具有间歇性的分布式电源正常情况下均运行于最大功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 状态, 不参与节点电压调节, 相当于电流源。因此, 本文中把每个节点看做为蓄电池和负荷的组合。

### 1.2 多储能直流微电网的分布式控制

#### 1.2.1 分布式控制

对于像多端口直流微电网这样的网络来说, 通过集中式的方法协调控制各个节点会造成信息网络复杂, 且对信道带宽要求较高, 任何一条通信通道受阻, 将导致全网信息交流的崩溃等问题。所谓的分布式控制, 即仅仅通过相邻节点之间的信息交换, 构建一个稀疏的信息交流网络, 就可获得全网的一致性响应。在这种控制下, 可实现节点的“即插即用”, 且其中一条信息通道的受阻, 不会影响整个系统的稳定性。

图 1 所示直流微电网中的信息交流网络可表示为图 2 所示的网络图。

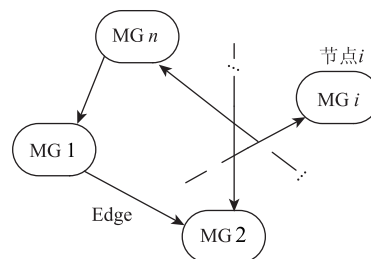


图 2 直流微电网信息交流网络

图 2 所示的信息交流网络可用顶点集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 边集  $E = V \times V$ , 以及邻接矩阵  $A = [a_{ij}]$  来表示, 其中  $a_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间信息交流的权重。在本文中, 如果节点  $i$  和节点  $j$  存在信息交流, 即  $(v_j, v_i) \in E$ , 则  $a_{ij} = 1$ , 否则,  $a_{ij} = 0$ 。网络的拉普拉斯矩阵可表示为  $L = D_m - A$ ,  $D_m$  为节点的输入矩阵, 表示为  $D_m = \text{diag} \{ \sum_{j \in N_i} a_{ij} \}$ , 其中  $N_i$  表示为节点  $i$  的相邻节点。由图论知识可知<sup>[17]</sup>, 对于信息非双向传递的信息交流网络, 网络拉普拉斯矩阵的特征值决定了网络的动态响应, 且当所有输入节点权重之和与输出节点权重之和相等时, 则认为该图的信息交流是平衡的。信息交流网络中动态一致算法可表示为

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (1)$$

式中:  $x_i(t)$  表示为第  $i$  个节点  $t$  时刻所接受的信息

值。式(1)的向量形式可表示为

$$\frac{dx}{dt} = -Lx \quad (2)$$

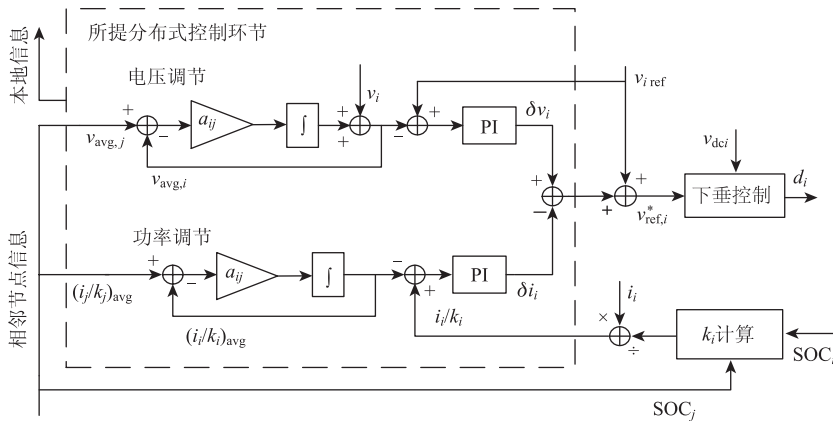
式中： $L$ 即为网络的拉普拉斯矩阵。

式(1)中  $x_i(t)$  迭代的最终结果即为全网一致

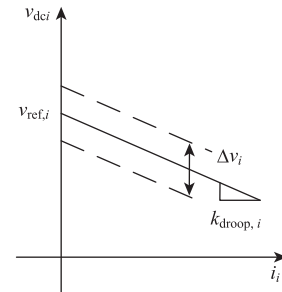
值，为  $(1/n) \sum_{i=1}^n x_i(0)$ 。

### 1.2.2 多储能直流微电网的分布式控制

本文所提出的直流微电网的分布式控制，是在传统下垂控制基础上，加入了分布式控制环节对其电压参考值进行修改，具体控制框图如图 3 所示。



(a) 本地节点分布式下垂控制



(b) 基于分布式控制的下垂特性

图 3 所提分布式控制框图

#### 1.2.2.1 平均电压控制环节

控制系统平均电压，使直流微网各个节点电压恢复至本地节点电压参考值，避免了下垂控制时使电压产生偏移。通过 PI 环节，增加电压补偿量，消除本地额定电压和平均电压之间的偏差。具体控制策略如图 3(a)所示。其中，平均电压的计算采用分布式控制方法，将式(1)中的  $x_i(t)$  换成所需计算的平均电压  $v_{avg,i}(t)$ ，则电压调节环节中平均电压的微分量算法如式(4)所示：

$$\frac{dv_{avg,i}(t)}{dt} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (v_{avg,j}(t) - v_{avg,i}(t)) + \frac{dv_i(t)}{dt} \quad (4)$$

式中： $v_i$  是测得的节点  $i$  的电压； $v_{avg,i}$  是节点  $i$  所计算的平均电压； $v_{avg,j}$  是从相邻  $j$  节点所得到的  $j$  节点所计算的平均电压；将本地的电压微分作为附加项  $dv_i(t)/dt$  加入式子参与平均电压的计算，目的是能够在本地节点电压受到扰动时提高电压调节环节的响应速度，加速平均电压的计算。

将式(4)等号两边同时积分可得平均电压算法

其中的分布式控制环节包括平均电压控制环节和功率协调控制环节。本文以蓄电池放电为例，图 3 (b)即为加入所提分布式控制后系统的下垂特性，新下垂特性表达式可表示为

$$\begin{aligned} v_{dci} &= v_{ref,i} + \delta v_i - \delta i_i - k_{droop,i} \cdot i_i = \\ &v_{ref,i} + \Delta v_i - k_{droop,i} \cdot i_i = \\ &v_{ref,i}^* - k_{droop,i} \cdot i_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $\delta v_i$ 和  $\delta i_i$  分别为电压调节环节以及功率调节环节所产生的电压偏差量； $\Delta v_i$  为两者综合调节的电压偏差量； $k_{droop,i}$  为本地节点下垂系数。

设计如式(5)所示：

$$v_{avg,i} = \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (v_{avg,j}(t) - v_{avg,i}(t)) dt + v_i(t) \quad (5)$$

#### 1.2.2.2 功率调节环节

不同蓄电池充放电电流按照不同比例进行分配的表达式可表示为

$$i_1 : i_2 : \dots : i_n = k_1 : k_2 : \dots : k_n \quad (6)$$

其中  $k_i$  为各电流所占的比例。为了实现蓄电池电流按照式(6)所示的比例系数分配，将式(6)进一步表示为

$$\frac{i_1}{k_1} = \frac{i_2}{k_2} = \dots = \frac{i_n}{k_n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{i_i}{k_i} \right) \quad (7)$$

从(7)式可以看出，只要满足等式(7)，就能够使负荷按照  $k_i$  比例系数进行分配。通过 PI 环节，增加电流补偿量，消除本地电流和平均电流之间的偏差。具体控制策略如图 3(a)所示。其中，平均电流的计算采用分布式控制方法，类似于平均电压的计算，平均电流的计算如式(8)所示，由

于平均电流已经是和本地实时的电流值作差然后输入PI控制环节的,因此,功率调节环中可不加上本地电流微分环节。

$$(i_i/k_i)_{\text{avg}} = \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} [(i_j/k_j)_{\text{avg}} - (i_i/k_i)_{\text{avg}}] dt \quad (8)$$

将蓄电池的荷电状态作为控制目标,平衡直流微电网内蓄电池的荷电状态可以提高蓄电池使用效率,延长蓄电池使用寿命。据此, $k_i$ 的具体表达式可表示为

$$k_i = 1 \pm k^* \times \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\text{SOC}_i - \text{SOC}_j) \quad (9)$$

式中:加号表示充电,减号表示放电。为保证系统稳定性, $k_{\min} < k_i < k_{\max}$ ,其最大最小值可通过下文稳定性分析得到。 $k^*$ 为荷电状态的调节系数,不管 $k^*$ 取何值,只要保证 $k_i$ 在最大最小值范围内,均能保证系统的稳定性。从式(9)可以看到,当 $\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\text{SOC}_i - \text{SOC}_j) \neq 0$ ,通过改变 $k_i$ 的值,使得荷电状态大的 $k_i$ 大,即所发出的电流大,反之亦然,最终使得各储能系统的荷电状态趋于一致。

## 2 两储能直流微电网的稳定性分析

综合上述所提直流微电网的分布式控制策略,为简化分析,本文对含两储能的直流微电网进行小干扰稳定性分析。首先,分别对直流微电网中各蓄电池列写线性化方程,然后通过直流母线侧的KCL关系得到整个直流微电网的状态方程,最后通过分析系统的特征值判断系统的稳定性。

### 2.1.1 蓄电池的状态方程

蓄电池的等效电路及控制系统框图如图4和图5所示。蓄电池模型采用通用模型<sup>[18]</sup>,即由内阻 $R_b$ 和受控电压源 $E_b$ 串联组成。

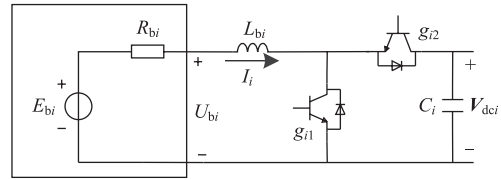


图4 简化的蓄电池拓扑

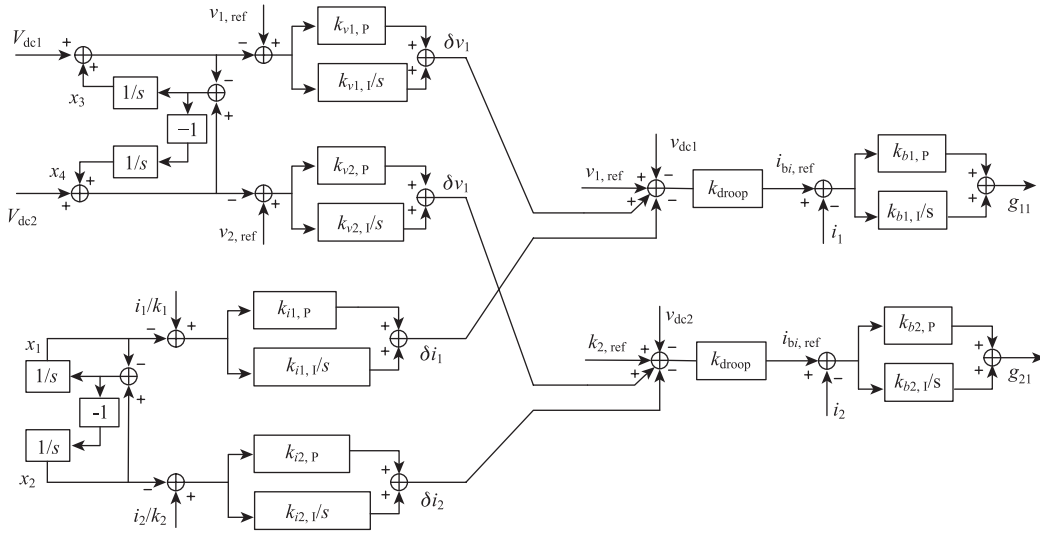


图5 两节点蓄电池分布式控制框图

根据图4和5可得出蓄电池拓扑的KVL方程和两节点分别对应的控制系统的状态方程,分别如式(10)~(12)所示:

$$\begin{cases} L_{b1} \frac{di_1}{dt} = E_{b1} - i_1 R_{b1} - (1 - g_{11}) V_{dcl} \\ L_{b2} \frac{di_2}{dt} = E_{b2} - i_2 R_{b2} - (1 - g_{21}) V_{dc2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 - x_1 \\ \frac{d\delta i_{1,1}}{dt} = k_{i1,1} (i_1/k_1 - x_1) \\ \frac{dx_3}{dt} = x_4 - x_3 + V_{dc2} - V_{dcl} \\ \frac{d\delta v_{1,1}}{dt} = k_{v1,1} (V_{dc\_ref} - V_{dcl} - x_3) \\ \frac{dg_{11,1}}{dt} = k_{b1,1} (i_{bref1} - i_1) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{dt} = x_1 - x_2 \\ \frac{d\delta i_{2,1}}{dt} = k_{i2,1}(\frac{i_2}{k_2} - x_2) \\ \frac{dx_4}{dt} = x_3 - x_4 + V_{dc1} - V_{dc2} \\ \frac{d\delta v_{2,1}}{dt} = k_{v2,1}(V_{dc\_ref} - V_{dc2} - x_4) \\ \frac{dg_{21,1}}{dt} = k_{b2,1}(i_{bref2} - i_2) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $E_{b1}$ 和 $E_{b2}$ 分别为理想电压源的电压值，为常数； $R_{b1}$ 和 $R_{b2}$ 为蓄电池内阻，为常数； $g_{11}$ 和 $g_{21}$ 分别为两节点双向 DC-DC 变流器放电时的占空比，其中 $g_{11,1}$ 和 $g_{21,1}$ 分别为其积分部分； $V_{dc1}$ 和 $V_{dc2}$ 分别为两节点电压值； $\delta i_{1,1}$ 和 $\delta i_{2,1}$ 分别为一二节点功率调节偏差的积分部分； $\delta v_{1,1}$ 和 $\delta v_{2,1}$ 分别为一二节点电压调节偏差的积分部分； $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 分别为一二节点分布式控制环节中的中间变量。其中两节点电流参考值可由式(13)表示：

$$\begin{cases} i_{bref1} = k_{droop}(V_{dc\_ref} + \delta v_1 - \delta i_1 - V_{dc1}) \\ i_{bref2} = k_{droop}(V_{dc\_ref} + \delta v_2 - \delta i_2 - V_{dc2}) \end{cases} \quad (13)$$

式中： $k_{droop}$ 为一二节点下垂控制中的下垂系数。

将式(10)~(12)分别进行线性化，可得两蓄电池的线性化方程，如式(14)所示：

$$\frac{d\Delta x_i}{dt} = \mathbf{A}_i \Delta x_i + \mathbf{B}_i \Delta u_i \quad (14)$$

式中： $i$ 取1和2分别表示第一个节点和第二个节点，其中，

$\Delta \mathbf{x}_1 = [\Delta i_1, \Delta x_1, \Delta x_3, \Delta \delta i_{1,1}, \Delta \delta v_{1,1}, \Delta g_{11,1}]^T$ ；  
 $\Delta \mathbf{x}_2 = [\Delta i_2, \Delta x_2, \Delta x_4, \Delta \delta i_{2,1}, \Delta \delta v_{2,1}, \Delta g_{21,1}]^T$ ；  
 $\Delta \mathbf{u}_1 = \Delta \mathbf{u}_2 = [\Delta V_{dc1}, \Delta V_{dc2}]^T$ ；系数矩阵 $\mathbf{A}_i$ 和 $\mathbf{B}_i$ 的表达式如下所示：

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & a_{i4} & a_{i5} & a_{i6} \\ 0 & a_{i7} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{i8} & a_{i9} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{i10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{i11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{i12} & a_{i13} & a_{i14} & a_{i15} & a_{i16} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} b_{i1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{i2} & b_{i3} \\ b_{i4} & 0 \\ b_{i5} & 0 \end{bmatrix} \circ$$

其中，

$$\begin{aligned} a_{i1} &= -\frac{k_{bi,P}V_{dc1(0)} + R_{bi}}{L_{bi}} - \frac{k_{bi,P}k_{droop}k_{ii,P}V_{dc1(0)}}{L_{bi}k_i}; \\ a_{i2} &= -\frac{k_{bi,P}k_{droop}k_{ii,P}V_{dc1(0)}}{L_{bi}}; a_{i3} = -\frac{k_{bi,P}k_{droop}k_{ii,P}V_{dc1(0)}}{L_{bi}}; \\ a_{i4} &= -\frac{k_{bi,P}k_{droop}V_{dc1(0)}}{L_{bi}}; a_{i5} = \frac{k_{bi,P}k_{droop}V_{dc1(0)}}{L_{bi}}; \\ a_{i6} &= \frac{V_{dc1(0)}}{L_{bi}}; a_{i7} = -1; a_{i8} = \frac{k_{ii,1}}{k_i}; a_{i9} = -k_{ii,1}; \\ a_{i10} &= -1; a_{i11} = -k_{ii,1}; a_{i12} = -k_{bi,1} - \frac{k_{bi,1}k_{droop}k_{ii,P}}{k_i}; \\ a_{i13} &= k_{bi,1}k_{droop}k_{ii,P}; a_{i14} = -k_{bi,1}k_{droop}k_{ii,P}; \\ a_{i15} &= -k_{bi,1}k_{droop}; a_{i16} = k_{bi,1}k_{droop}; \\ b_{i1} &= \frac{g_{i1(0)} - 1}{L_{bi}}; b_{i2} = -1; b_{i3} = 1; b_{i4} = -k_{ii,1}; \\ b_{i5} &= -(1 + k_{ii,P})k_{bi,1}k_{droop} \circ \end{aligned}$$

### 2.1.2 直流微电网的状态方程

两节点基于蓄电池的直流微电网的电流流动关系如图6所示。

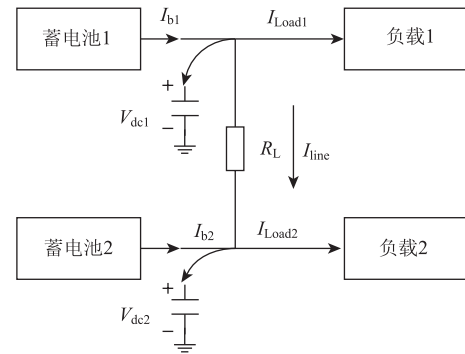


图6 两节点直流微电网电流关系图

根据网络的 KCL 关系，可列出系统的电流平衡方程，如式(15)所示：

$$\begin{cases} C_1 \frac{dV_{dc1}}{dt} = I_{b1} - I_{Load1} - I_{line} \\ C_2 \frac{dV_{dc2}}{dt} = I_{b2} - I_{Load2} + I_{line} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $I_{b1}$ 和 $I_{b2}$ 分别为两蓄电池所送出的电流； $I_{Load1}$ 和 $I_{Load2}$ 分别为负荷所吸收的电流； $C_1$ 和 $C_2$



为两节点处的电容。各电流表达式如式(16)所示:

$$\begin{cases} I_{b1} = (1 - g_{11})i_1 \\ I_{b2} = (1 - g_{21})i_2 \\ I_{Load1} = P_{Load1}/V_{dc1} \\ I_{Load2} = P_{Load2}/V_{dc2} \\ I_{line} = (V_{dc1} - V_{dc2})/R_L \end{cases} \quad (16)$$

将节点电压作为状态变量之一, 将式(15)线性化, 结合式(10)~(12), 可得直流微网群的线性化方程为

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A_{sys}\Delta x \quad (17)$$

式中:  $A_{sys}$  为两个节点的直流微网群系统的系数矩阵。其中  $\Delta x = [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta V_{dc1}, \Delta V_{dc2}]^T$ , 系统

的系数矩阵表示为:  $A_{sys} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 & B_1 \\ 0 & A_2 & B_2 \\ A'_1 & A'_2 & A'_{dl} \end{bmatrix}$ 。系统

系数矩阵表达式中部分子矩阵表达式如下:

$$A'_i = [a'_{i1}, a'_{i2}, a'_{i3}, a'_{i4}, a'_{i5}, a'_{i6}, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$A'_{dl} = [c'_1, c'_2]。其中:$$

$$a'_{i1} = \frac{1}{C_i}(1 - g_{i1(0)}); a'_{i2} = \frac{1}{C_i}(k_{bi,P}k_{droop}k_{i1,P}i_{i(0)});$$

$$a'_{i3} = -\frac{1}{C_i}(k_{bi,P}k_{droop}k_{i2,P}i_{i(0)}); a'_{i6} = -\frac{1}{C_i}i_{i(0)};$$

$$a'_{i4} = -\frac{1}{C_i}(k_{bi,P}k_{droop}i_{i(0)}); a'_{i5} = \frac{1}{C_i}(k_{bi,P}k_{droop}i_{i(0)});$$

$$c'_1 = \frac{1}{C_1}(k_{b1,P}k_{droop}k_{v1,P}i_{1(0)} + k_{b1,P}k_{droop}i_{1(0)} + \frac{P_{Load1}}{V_{dc1(0)}^2} - \frac{2}{R_L})$$

$$c'_2 = \frac{1}{C_2}(k_{b2,P}k_{droop}k_{v2,P}i_{2(0)} + k_{b2,P}k_{droop}i_{2(0)} + \frac{P_{Load2}}{V_{dc2(0)}^2})$$

### 2.1.3 直流微电网稳定性分析

基于上述推得的两节点蓄电池直流微电网的线性化方程, 通过 MATLAB 可画出系统特征根随功率调节环中  $k_i$  变化的根轨迹图。直流微电网中各元件以及控制器参数表 1 所示。

表 1 直流微网群各元件及控制器参数

名称	数值 (p. u.)	名称	数值 (p. u.)
$k_{b1,P}, k_{b2,P}$	1.5	$k_{b1,I}, k_{b2,I}$	20
$k_{i1,P}, k_{i2,P}$	0.1	$k_{i1,I}, k_{i2,I}$	1
$k_{v1,P}, k_{v2,P}$	5	$k_{v1,I}, k_{v2,I}$	10
$k_{droop}$	0.3	$L_{b1}, L_{b2}$	0.05
$R_L$	0.4	$C_1, C_2$	0.1
$R_{b1}, R_{b2}$	0.1		

从图 7 可以看出, 当  $k_i=1(i=1, 2)$ , 即系统

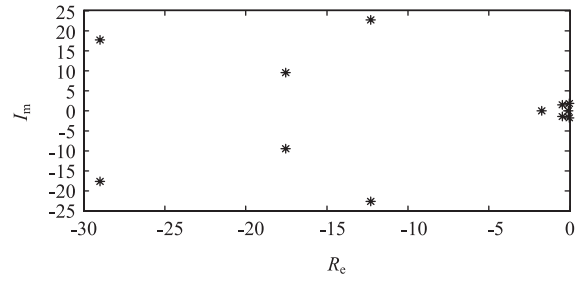


图 7  $k_i=1$  时系统特征值分布

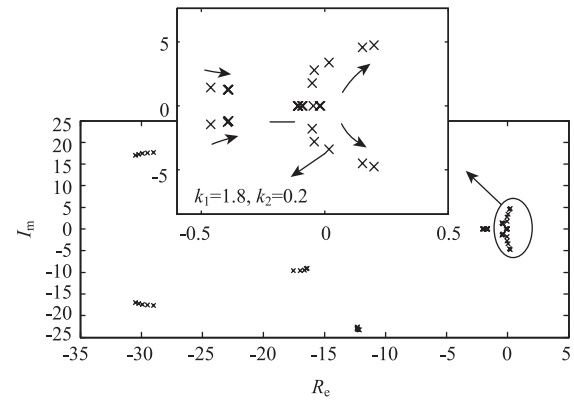


图 8  $k_1$  增大  $k_2$  减小时系统特征值根轨迹

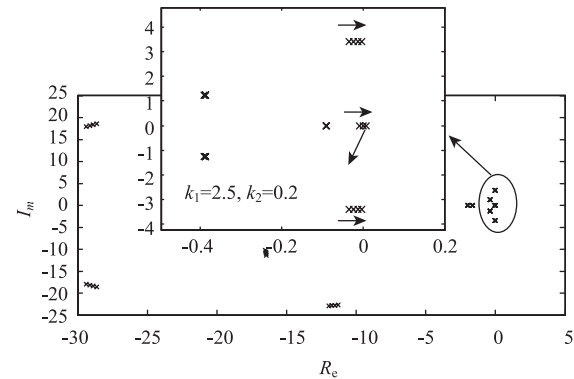


图 9  $k_1 > 1.8$  且  $k_2 = 0.2$  时系统特征值根轨迹

中两蓄电池荷电状态一样的情况下, 系统的特征值均位于负半轴, 系统处于稳定状态。当两蓄电池荷电状态不一样时, 设  $SOC_1 > SOC_2$ , 即  $k_1$  增大  $k_2$  减少时, 系统的特征根轨迹如图 7 所示。从图 8 中可看到, 当  $k_1$  增大至 1.8,  $k_2$  减少至 0.2 时, 实轴两侧的特征根实部首先到达零, 当继续减少  $k_2$  时, 两侧的特征值实部继续由负变正, 系统不稳定。从图 9 可以看出, 当保持  $k_2$  为 0.2 不变, 继续增大  $k_1$  时, 实轴两侧的特征根实部由零向负半轴移动, 而处于实轴上的特征根, 其实

部仍向正半轴移动，当  $k_1=2.5$  时，实轴上的特征根实部变为零，增大  $k_1$  时，特征根实部变为正，系统不稳定。

从上述特征根轨迹的分析可以看出，当  $0.2 < k_i < 2.5$  时，系统能保持稳定状态，即  $k_{\min}=0.2$ ， $k_{\max}=2.5$ 。由此可得出，(7)式中  $k^*$  不论取何值，只需使  $k_i$  保持于最大最小值之间系统便能保持稳定。

### 3 仿真分析

为进一步通过时域仿真验证所提控制策略的有效性，本文以三节点基于储能系统的直流微电网为例，利用 MATLAB/SIMULINK 仿真软件搭建了如图 10 所示的仿真系统，系统中负荷平均分配至每个节点。 $R_{L1}$  和  $R_{L2}$  为直流母线的电阻。节点的信息交流网络如图中①②③所示。每个节点中由两部分组成：

- ① 储能系统：采用额定电压为 144V，额定容量为 100Ah 的铅酸蓄电池，通过双向 DC-DC 变换器并入直流母线。双向 DC-DC 变换器本文所提的分布式控制方法，协调控制各直流微网群。
- ② 负荷单元：额定电压为 220V，频率为 50Hz 的交流负荷通过 AC-DC 变换器并入直流母线，AC-DC 变换器采用恒压恒频控制模式。

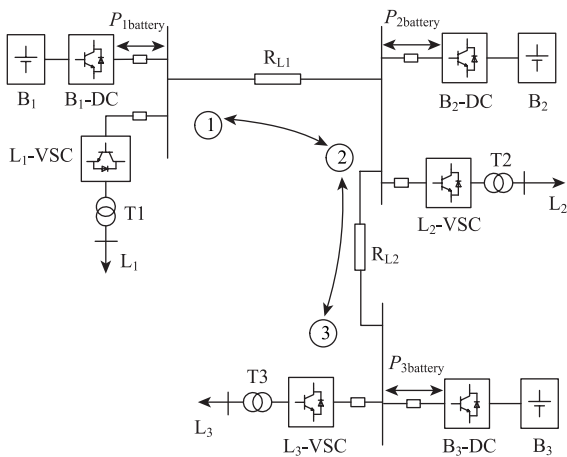


图 10 三节点储能系统直流微网群仿真系统图

#### 3.1 有无分布式控制时系统仿真对比

图 11~图 14 分别为无分布式控制、仅加入平均电压控制、仅加入功率协调控制以及两者均加入时系统的仿真图。文中所有仿真图细实线表示节点 1 的数据，虚线表示节点 2 的数据，粗实线表

示节点 3 的数据。为直观分析，设各节点电压参考值分别为  $v_{1,ref}=390V$ ； $v_{2,ref}=395V$ ； $v_{3,ref}=400V$ ； $SOC_1=75$ ； $SOC_2=74.95$ ； $SOC_3=74.9$  且  $k_{droop1}=k_{droop2}=k_{droop3}$  各节点负荷均为 10kW。由图 11 可看出，各节点电压由于下垂控制的作用，均偏离各自额定电压，由于节点 3 电压高，蓄电池发出的功率多，节点 1 电压小，蓄电池发出的功率少，最终导致各蓄电池荷电状态差异越来越大。从图 12 可看出，当仅加入平均电压控制时，各节点电压得到了补偿，但是蓄电池荷电状态之间的差异仍然越来越大。从图 13 可以看出，当仅加入功率协调控制时，系统荷电状态趋于一致，最终蓄电池所带负荷相同，电压趋于一致，稳定后电压仍然偏移额定值较大的值，尤其是节点 3 偏移其额定值近 10V。从图 14 可以看出，同时加入平均电压控制和功率协调控制后，各蓄电池荷电状态趋于一致，各节点电压得到了补偿，电压最终稳定于平均额定电压。各节点电压最终没有补偿回各自额定电压是由于电流调节后作用的结果。

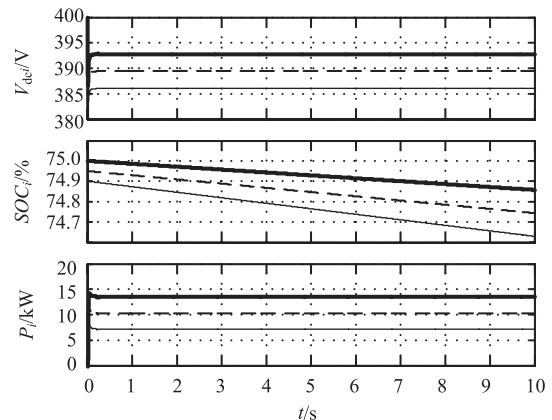


图 11 无分布式控制时系统仿真图

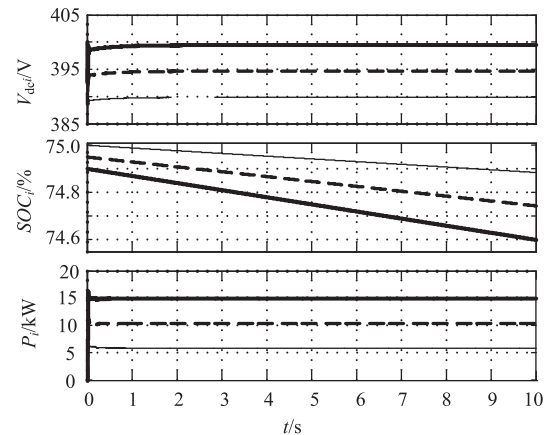


图 12 仅加入平均电压控制时系统仿真图

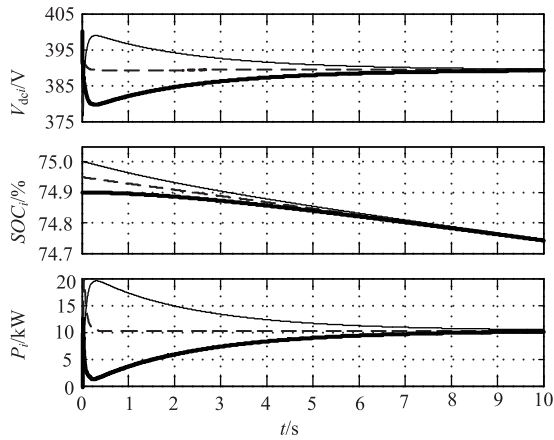


图13 仅加入功率协调控制时系统仿真图

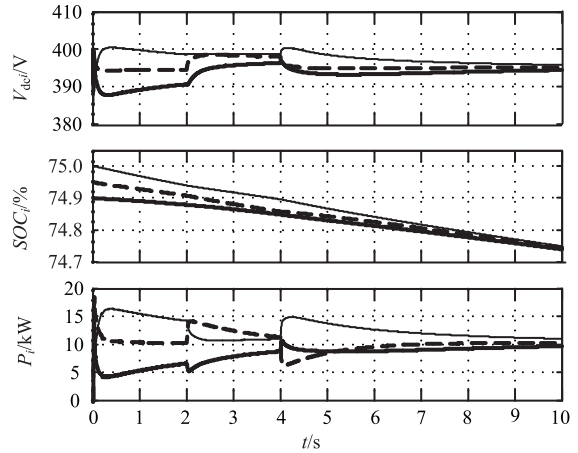


图15 通信通道切断以及恢复时系统动态响应

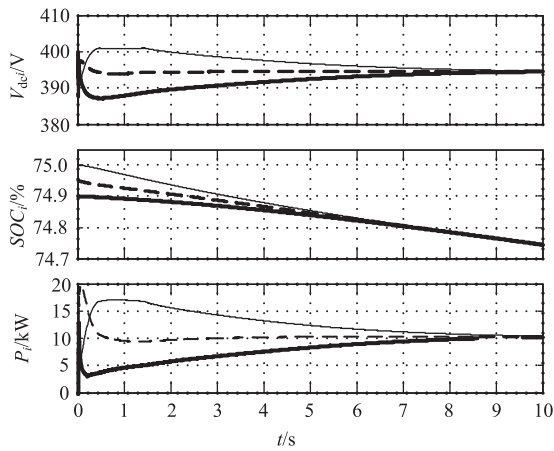


图14 两种均加入时系统仿真图

### 3.2 系统通讯线路故障时动态响应

图15为节点1和节点2的通信通道切断和恢复时系统动态响应仿真图。在 $t=2\text{s}$ 时,节点1和节点2的通讯通道被切断,节点1和节点2失去联系, $a_{12}=a_{21}=0$ ,节点1电压调节环节中由于有积分的存在,使得偏移量达到饱和,保持偏移量不变,电压保持恒定;另外,节点1不参与功率调节,所发功率下降,只用于平衡本地负荷,节点2和节点3仍在分布式控制作用下,荷电状态趋于一致。在 $t=4\text{s}$ 时,节点1和2恢复通讯,此时 $a_{12}=a_{21}=1$ ,三节点在分布式控制的作用下,使得最终电压得到稳定,且各节点荷电状态趋于一致。

## 4 结束语

为充分发挥直流微电网中储能系统的作用,本文提出了基于储能系统直流微电网的分布协调控制策略,其中包含平均电压控制环节和功率协

调控制环节,不仅能维持系统的电压水平,还能使负荷按照各储能系统的荷电状态来分配,延长了蓄电池的使用寿命。在此分布式控制中,每个节点只需通过和其相邻节点的通信就可达到全网的动态响应,提高了系统的稳定性。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 郑漳华,艾芊. 微电网的研究现状及在我国的应用前景 [J]. 电网技术, 2008, 32(16): 27-31.
- [3] 张国荣,徐宏. 直流微网中的关键技术综述 [J]. 低电压器, 2012, 9(15): 25-36.
- [4] 王晓虹,艾芊. 直流微电网在配电系统中的研究现状与前景 [J]. 低压电器, 2012, 9(5): 1-7.
- [5] Hammerstrom D J. AC versus DC distribution systems: Did we get it right [J]. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet, 2007: 1-5.
- [6] Anand S, Fernandes B G. Steady state performance analysis for load sharing in dc distributed generation system [J]. Proc. 10th Int. Conf. Environ, 2011: 1-4.
- [7] Li Y W, Kao C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operation in a low voltage multi-bus microgrid [J]. IEEE Trans. on Power Electron, 2009: 2977-2988.
- [8] He J, Li Y W. Analysis, design and implementation of virtual impedance for power electronics interfaced distributed generation [J]. IEEE Trans. on Ind. Appl, 2011: 2525-2538.
- [9] Kakigano H, Nishino A, Miura Y, et al. Distribu-



- tion voltage control for DC microgrid by converters of energy storages considering the stored energy [C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Atlanta, USA; 2010; 2851 - 2856.
- [10] Diaz N, Dragicevic T, Vasquez J C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for dc microgrids: A new concept on cooperative control without communications beyond droop control [J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2014; 2476 - 2485.
- [11] 陆晓楠, 孙凯, 黄力培, 等. 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 16(33): 37 - 46.
- [12] Zhou T, Francois B. Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron, 2011, 58(1): 95 - 104.
- [13] Guerrero J M, Chandorkar M, Lee T, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids-part I: Decentralized and hierarchical control [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron, 2013, 60(4): 1254 - 1262.
- [14] Lu X, Guerrero J M, Sun K, et al. An improved droop control method for dc microgrids based on low bandwidth communication with dc bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy [J]. IEEE Trans. on Power Electron, 2014, 29(4): 1800 - 1812.
- [15] Anand S, Fernandes B G, Guerrero J M. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage dc microgrids [J]. IEEE Trans. on Power Electron, 2013, 28(4): 1900 - 1913.
- [16] Meng L, Dragicevic T, Guerrero J M, et al. Dynamic consensus algorithm based distributed global efficiency optimization of a droop controlled dc microgrid [J]. IEEE Energy Conf, 2014: 1276 - 1283.
- [17] Olfati-Saber R, Fax J A, et al. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems [J]. Proc. IEEE, 2007, 95(1): 215 - 233.
- [18] Tremblay O, Dessanit L A, Dekkiche A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles [J]. Vehicle Power and Propulsion Conference, Arlington, 2007: 284 - 289.
- 
- 收稿日期:** 2015-05-18
- 作者简介:**
- 朱晓荣(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电及并网技术、电力电子技术在电力系统中的应用等, E-mail: ncepuzxr@126.com;
- 蔡杰(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术, E-mail: 554889777@qq.com。
- (责任编辑: 林海文)