

# 基于有限时间收敛的直流微电网协调控制

孙 勇<sup>1</sup>, 刘志君<sup>1</sup>, 李振元<sup>1</sup>, 李宝聚<sup>1</sup>, 胡亚龙<sup>2</sup>, 韦 巍<sup>2</sup>

(1. 国网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 本文设计了一种应用在直流微电网中的二次控制策略。通过对有限时间收敛的多代理控制协议的应用, 各个分布式发电单元只接收相邻节点的信息, 实现了各个分布式发电单元输出电流的精确均分和输出电压的平均值恢复。电流的均分通过对虚拟阻抗的调节实现, 电压的恢复通过对参考电压的调节实现, 此外设计了一种对系统虚拟阻抗的协同调节策略来改善系统的动态性能。最后通过在 Matlab/Simulink 上搭建直流微电网仿真模型, 并在 RT-LAB 上搭建了硬件在环实验, 验证了控制策略在低通信速率下的有效性。

**关键词:** 直流微电网; 有限时间收敛; 分布式控制; 虚拟阻抗; 低通信速率

**DOI:** 10.12067/ATEEE1806028

**文章编号:** 1003-3076(2019)12-0010-09

**中图分类号:** TM727

## 1 引言

随着分布式电源 (Distributed Generator, DG) 的增多和电力电子器件的广泛应用, 直流微电网因结构简单, 易于控制, 效率较高等特点吸引了许多学者的研究<sup>[1-3]</sup>。为了实现直流微电网的高效稳定运行, 对于接入的 DG 需要协调其输出电流, 实现对负载的均衡分配。

为实现各个 DG 的协调运行, 在直流微电网中, 电压电流下垂 (Voltage Current Droop, VCD) 控制策略因其只需要每个 DG 的本地信息, 无需通信等优点得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。但由于直流微电网本身的固有特性决定了下垂控制无法实现各个分布式发电单元输出电流的精确均分, 同时下垂控制策略不可避免地带来了输出电压幅值的跌落<sup>[5]</sup>。为了实现输出电流的精确均分和输出电压幅值的恢复, 二次控制策略被广泛采用<sup>[6]</sup>。

二次控制策略的实现包括集中式和分布式两种实现方案。在集中式的实现中, 需要中央控制器收集每个 DG 的状态信息, 并根据接受的信息给每个 DG 下达控制指令。集中式控制实现简单, 中央控制器易于做一些复杂的功能<sup>[7,8]</sup>, 但一旦中央控制

器故障, 整个系统都将受到影响。文献[7]设计了一种主动系统控制方法, 在此控制策略中各种 DG 根据自身提前设计的控制策略, 对电网中的信息进行反应, 虽然没有中央控制器, 但中央控制器的任务已经被提前分配给每一个 DG。相对于集中式控制需要获取所有节点的信息, 分布式控制只需每个 DG 获取相邻节点的信息<sup>[9,10]</sup>, 通信布局上只需相邻节点之间保持通信, 同时只要整个系统保持连通, 任何一个线路的故障, 不会影响整个系统的控制。但分布式控制系统的实现需要提前设计好分布式协议, 对算法的要求较高。

为了提高多代理系统的收敛速度, 近年来, 有限时间收敛吸引了许多学者的研究<sup>[11,12]</sup>。文献[11]运用有限时间收敛协议<sup>[13]</sup>对直流微电网进行了均流和电压恢复, 但其电压恢复机制不够精确。文献[14]根据动态一致性算法对各个 DG 进行了均流和电压恢复。

在直流微电网中, 在电流的均分以及电压幅值的恢复等目标之外, 系统的动态性能受到了越来越多的注意<sup>[15-17]</sup>。文献[15]通过在下垂环节添加补偿虚拟阻抗提高系统的动态性能<sup>[18]</sup>。文献[16]通过多代理系统调整虚拟阻抗实现电流的均分, 并通

**收稿日期:** 2018-06-11

**基金项目:** 分布式有源配电网的规划与分析研究项目 (SGTYHT/16-JS-198)

**作者简介:** 孙 勇 (1980-), 男, 山东籍, 高级工程师, 研究方向为风力调度与控制;

刘志君 (1964-), 男, 吉林籍, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定运行。

过调整虚拟阻抗的平均值提高动态性能。文献[17]通过灵敏度矩阵提高系统的动态性能,但灵敏度矩阵需要提前设置。

本文针对上述问题提出了一种基于有限时间收敛的分布式二次控制策略。其中分布式协议选取文献[13]中的协议。每个 DG 只需获取其相邻节点的信息,通过对各个 DG 的虚拟阻抗控制实现了输出电流的精确均分<sup>[19]</sup>,同时通过动态一致性算法获取 DG 输出电压的平均值,并对平均值进行了恢复,使其恢复至额定值<sup>[20]</sup>。在直流微电网中,各个 DG 的虚拟阻抗值直接影响了系统的输出动态特性,因此设计了一种虚拟阻抗协同控制策略实现了各个 DG 虚拟阻抗值的一定调整,提升了系统的动态性能。

## 2 多代理分布式系统有限时间控制

### 2.1 图论基础

本文所采用的直流微电网拓扑图如图 1 所示,系统中每一个 DG 作为一个节点,节点间由通信网络连接,通信网络拓扑和物理连接拓扑一致。系统的联通图记为  $G(V, \varepsilon, A)$ , 系统节点集合为  $V = \{1, \dots, N\}$ , 其中  $N$  为节点个数,  $\varepsilon = \{(i, j) \mid i, j \in V\}$  表示边的集合,系统各个节点间的连接关系用邻接矩阵  $A = [a_{ij}]$  表示,  $A$  为  $N$  维方阵,如果节点  $i$  和节点  $j$  之间是联通的,则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。节点  $i$  的邻接点集合记为  $N_i$ 。定义度矩阵  $D$  为:

$$D = [d_i] \quad (1)$$

式中,  $d_i$  为节点  $i$  的度,  $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ 。

网络的拉普拉斯矩阵  $L$  定义为:

$$L = D - A \quad (2)$$

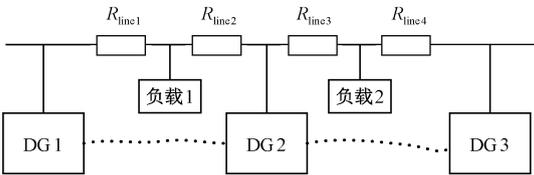


图 1 直流微电网示意图

Fig. 1 Schematic of DC microgrids

### 2.2 有限时间控制协议

传统的多代理分布式控制策略通过接受邻接点的状态信息,然后与自身的状态信息做差得出其状态信息的修正量,可以用式(3)表示。

$$u_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j - x_i) \quad (3)$$

式中,  $x_i$  和  $x_j$  分别为多代理系统中节点  $i$  和  $j$  的状

态信息;  $u_i$  为状态信息的修正量。关于它的应用和分析已经有许多研究说明,这个协议虽然可以使各个代理达到一致性,但其收敛时间却较长。为了改善这个缺陷,本文应用有限时间收敛协议来协同控制各个 DG 的电流和电压,和式(3)类似,有限时间收敛协议可以表示如下:

$$u_i(t) = \beta \text{sig} \left[ \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j - x_i) \right]^\alpha + \gamma \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j - x_i) \quad (4)$$

式中,  $\beta, \gamma$  为比例系数,  $\beta > 0, \gamma \geq 0; \alpha$  为调整收敛的速率,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。通常来讲  $\alpha$  越大则收敛速度越快,反之,收敛速度减缓。函数  $\text{sig}(x)$  定义如下:

$$\text{sig}(x_i)^\alpha = \text{sign}(x_i) |x_i|^\alpha \quad (5)$$

函数  $\text{sign}(x_i)$  定义如下:

$$\text{sign}(x_i) = \begin{cases} 1 & x_i > 0 \\ 0 & x_i = 0 \\ -1 & x_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

关于式(4)的收敛性在文献[11,12]中都给出了详细的证明,这里不再赘述。

## 3 协同控制策略

### 3.1 VCD 控制策略

在直流微电网中 VCD 控制策略为根据输出电流大小来负反馈调整其输出电压,因其简单有效得到了广泛的采用,输出电流和输出电压之间的关系可以表示如下:

$$V_{\text{out},i} = V_{\text{ref}} - R_{v,i} I_{\text{out},i} \quad (7)$$

式中,  $V_{\text{out},i}$  为  $DG_i$  的输出电压;  $V_{\text{ref}}$  为参考电压;  $I_{\text{out},i}$  为输出电流;  $R_{v,i}$  为下垂系数(虚拟阻抗)。其实现原理为实现多个 DG 的电流均分,每个 DG 通过设置不同的下垂系数来设定其理想的负荷分担比例,各个 DG 的最大输出电流与下垂系数之间为反比例关系,具体可以表示如下:

$$R_{v,i} I_{\text{max},i} = R_{v,j} I_{\text{max},j} \quad (8)$$

式中,  $I_{\text{max},i}$  为  $DG_i$  的最大输出电流。

下垂控制策略的实际应用等效图如图 2 所示,各个 DG 的输出电流可以用式(9)计算求得:

$$I_{\text{out},i} = \frac{V_{\text{out},i} - V_{\text{load}}}{R_{\text{line},i}} \quad (9)$$

式中,  $V_{\text{load}}$  为负荷节点处的电压幅值;  $R_{\text{line},i}$  为  $DG_i$  到负荷的线路阻抗。将式(7)代入式(9)可以推导出:

$$I_{\text{out},i} = \frac{V_{\text{ref},i} - V_{\text{load}}}{R_{\text{line},i} + R_{v,i}} \quad (10)$$

式中,  $V_{ref,i}$  为各个节点的参考电压。

由式(10)可知每个 DG 的实际输出电流不仅受到各自的下垂系数影响,同时也受到线路阻抗的影响,由于线路阻抗的未知且不成比例,在下垂控制策略下,其输出电流几乎不可能实现精确的均分。同时由下垂公式可知,只要存在输出电流,则每个 DG 的输出电压幅值必然产生幅值的跌落,在无通信获取全局信息的情况下,上述问题很难解决。

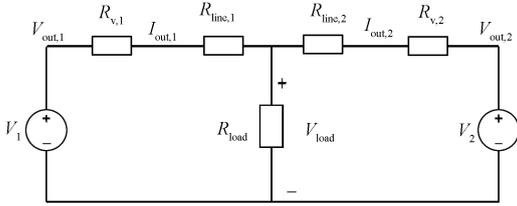


图2 下垂控制等效图

Fig. 2 Equivalent circuit of droop control

### 3.2 电流协同控制策略

由3.1节可知,在VCD控制策略中,由于线路阻抗的影响,电流的精确均分很难实现。因此,二次控制策略的采用是十分必要的。本节根据有限时间收敛协议设计了多个DG的输出电流精确均分控制策略,如图3所示。

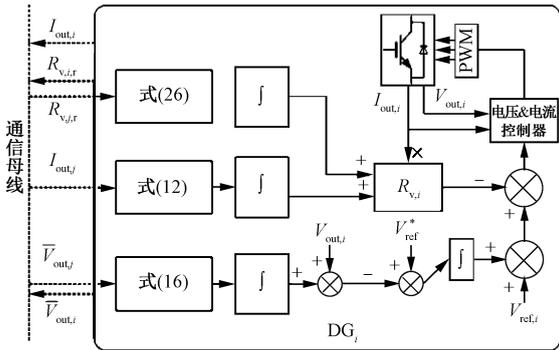


图3 DG分布式控制框图

Fig. 3 Distributed control schematic of DG

为实现各个 DG 输出电流的调节,由式(7)可知,通过调整 DG 的参考电压来调整输出电压,进而调整输出电流,也可通过调整 DG 的虚拟阻抗来调整输出电流。考虑到对系统动态性能的影响,本文中对于输出电流的调整通过虚拟阻抗的调整实现。

对于本文中的各个 DG 组成的多代理系统,为实现其输出电流的分布式控制,需要各个 DG 采集其本地的电流信息,并将此信息发送给其邻接节点,并根据电流信息的大小调整其下垂系数。下垂系数的修正量可以用式(11)计算:

$$u_i(t) = \beta \text{sig} \left\{ \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left[ \frac{I_{out,i}(t)}{k_i} - \frac{I_{out,j}(t)}{k_j} \right] \right\}^\alpha + \gamma \sum_{j \in N_i} a_{ij} \left[ \frac{I_{out,i}(t)}{k_i} - \frac{I_{out,j}(t)}{k_j} \right] \quad (11)$$

式中,  $k_i$  为各个 DG 的电流分担比例。得出其下垂修正量后,可以由此修正量计算其具体的下垂系数,下垂系数的计算如下:

$$R_{v,i}(t) = R_{v,i}^* + C_{1,i} \int_0^t u_i(\tau) d\tau \quad (12)$$

式中,  $R_{v,i}^*$  为虚拟阻抗的初始值;  $C_{1,i}$  为调整系数,用来调节虚拟阻抗的调整速率。

由上述控制策略可知,由于分布式控制协议的收敛性,在稳态时必然有:

$$\frac{I_{out,i}}{k_i} = \frac{I_{out,j}}{k_j} \quad (13)$$

### 3.3 电压协同控制策略

如3.1节所述,在VCD控制策略中,必然产生各个 DG 输出电压的跌落。电压幅值的过多跌落不利于各个负载的接入和稳定运行,因此需要在二次控制中恢复系统的电压。但由于网络中线路阻抗的影响,在电流精确均分的情况下,不可能实现每个 DG 的输出电压都恢复至额定电压值,通常恢复各个 DG 的输出电压平均值至额定电压。

因此,在电压恢复中,关键是求出所有 DG 电压平均值。文献[20]设计了一种分布式求平均值算法,以电压平均值计算为例,各个 DG 电压平均值估计由其本地电压信息加上电压的修正量求和获取,同时利用分布式通信确保各个 DG 平均值估计一致。各个 DG 电压平均值估计值的具体计算为:

$$\begin{cases} \bar{V}_{out,i}(t) = V_{out,i}(t) + \int_0^t u_i(\tau) d\tau \\ u_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\bar{V}_{out,j}(t) - \bar{V}_{out,i}(t)] \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\bar{V}_{out,i}(t)$  为  $DG_i$  对于整体电压平均值的估计值。通过对各个 DG 估计值的分布式控制,最终所有 DG 平均值估计将收敛到系统整体电压的平均值。

本文根据有限时间收敛协议和上述平均值估计器设计了电压的协同控制策略,如图3所示。此控制策略的目标为恢复各个 DG 的电压平均值至额定电压值,因此在电压恢复前需要计算系统中各个 DG 的电压平均值,以节点  $i$  为例,其输出电压参考指令可以用式(15)计算:

$$V_{ref,i}(t) = V_{ref}^* + C_{V,R} \int_0^t [V_{ref}^* - \bar{V}_{out,i}(\tau)] d\tau \quad (15)$$

式中,  $C_{V,R}$  为电压恢复系数; 系统的电压平均值为:

$$\begin{cases} \bar{V}_{out,i}(t) = V_{out,i}(t) + C_V \int_0^t u_i(\tau) d\tau \\ u_i(t) = \beta \text{sig} \left\{ \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\bar{V}_{out,j}(t) - \bar{V}_{out,i}(t)] \right\}^\alpha + \\ \gamma \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\bar{V}_{out,j}(t) - \bar{V}_{out,i}(t)] \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $C_V > 0$  为调整系数。由式(16)可知, 由于  $\beta > 0, \gamma > 0$ , 且  $u_i(t)$  两部分的正负符号一致, 因此必然存在系数  $h_i > 0$  使得:

$$u_i(t) = (h_i \beta + \gamma) \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\bar{V}_{out,j}(t) - \bar{V}_{out,i}(t)] \quad (17)$$

同时由于

$$\begin{aligned} \dot{\bar{V}}_{out,i}(t) &= \dot{V}_{out,i}(t) + C_V (h_i \beta + \gamma) \cdot \\ &\quad \sum_{j \in N_i} a_{ij} [\bar{V}_{out,j}(t) - \bar{V}_{out,i}(t)] \end{aligned} \quad (18)$$

式中, “ $\cdot$ ”表示微分。

所以整个系统的表达式可以表示为:

$$\dot{\bar{V}}_{out}(t) = \dot{V}_{out}(t) - C_V (h_i \beta + \gamma) \mathbf{L} \bar{V}_{out}(t) \quad (19)$$

对其进行 Laplace 变换得:

$$s \bar{V}_{out}(s) = s V_{out}(s) - C_V (h_i \beta + \gamma) \mathbf{L} \bar{V}_{out}(s) \quad (20)$$

可以求出系统的电压平均值与电压间的关系为:

$$\bar{V}_{out}(s) = s [\mathbf{I} + C_V (h_i \beta + \gamma) \mathbf{L}]^{-1} V_{out}(s) \quad (21)$$

因为  $\mathbf{L}$  为 Hermitian 矩阵, 由矩阵的特征值分解可知, 其可以分解为:

$$\mathbf{L} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \quad (22)$$

式中,  $\lambda_i$  为  $\mathbf{L}$  的特征值;  $\mathbf{v}_i$  为对应的特征向量。需要注意的是  $\mathbf{L}$  秩为  $N-1$ , 所以  $\lambda_1 = 0$ , 且由于  $\mathbf{L}$  为连通图, 因此  $\lambda_i > 0, i > 1$ 。

因此式(21)可以表示为:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{V}_{out}(t) &= \lim_{s \rightarrow 0} \bar{V}_{out}(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{N} \mathbf{1} \mathbf{1}^T + \sum_{i=2}^N \frac{s}{s + \lambda_i C_V (h_i \beta + \gamma)} \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^H \right] V_{out}(s) \\ &= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \mathbf{1} \mathbf{1}^T V_{out}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{out,i}^s \end{aligned} \quad (23)$$

由式(23)可知, 每个 DG 的平均值估计都将收敛到一致, 且收敛值为系统各个节点的输出电压平均值。同时根据式(15)调节系统的输出电压。

### 3.4 虚拟阻抗协同控制策略

由图2可知, 在上述 VCD 控制, 电流均分控制和电压恢复控制下, 系统中的电流被精确均分, 电压平均值得到恢复, 因为负荷节点处的节点电压幅值变化较小, 因此负荷的电流变化可以忽略。将两个 DG 的输出电流  $I_1, I_2$  和负荷的节点电压  $V_{load}$  看作已知量, 而两个 DG 处的虚拟阻抗和节点电压为未知量, 系统的电路方程如下:

$$\begin{cases} V_{out,1} - (R_{v,1} + R_{line,1}) I_{out,1} = V_{load} \\ V_{out,2} - (R_{v,2} + R_{line,2}) I_{out,2} = V_{load} \\ V_{out,1} + V_{out,2} = 2V_{ref}^* \end{cases} \quad (24)$$

显然, 上述系统中关于未知量输出电压和虚拟阻抗的解有无穷多个。而在实际的系统中,  $R_{v,i}$  的值对于系统的动态性能影响很大, 这由式(10)的微分可知。而在二次控制器的均流和电压恢复中, 会极大地影响各个 DG 的虚拟阻抗稳态值。而尤为要避免的状况是, 虚拟阻抗值出现负值的情况, 在这种情况下, 由于有些 DG 的阻抗值为负值, 有些 DG 的阻抗值为正值, 在通信正常情况下负荷的波动将以不同的反馈形式调整系统, 这与 VCD 控制中的调整机制相悖。在通信故障情况下, 甚至影响系统整体的稳定性。因此, 需要在均流和电压恢复操作后对系统的虚拟阻抗值进行一定程度的调整, 避免上述情况的发生。

本文针对上述问题, 设计了一种基于有限时间收敛的多代理系统虚拟阻抗调整策略。调整策略如图3所示。各个 DG 的虚拟阻抗值包含两个修正量, 一个为电流控制器计算的修正量, 另一个为虚拟阻抗协同控制计算出的修正量, 虚拟阻抗值的计算如式(25)所示。

$$R_{v,i} = R_{v,i}^* + \Delta R_{v,i,c} + \frac{1}{k_i} \Delta R_{v,i,r} \quad (25)$$

式中,  $\Delta R_{v,i,c}$  为电流控制器的输出补偿电阻;  $\Delta R_{v,i,r}$  为虚拟阻抗协同控制器的输出补偿电阻, 它可以用式(26)计算求得:

$$\dot{\Delta R}_{v,i,r} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\Delta R_{v,j,r} - \Delta R_{v,i,r}) + f(R_{v,i}) \quad (26)$$

其中, 函数  $f(x)$  定义如下:

$$f(R_{v,i}) = \begin{cases} 1 & R_{v,i} < R_{\min} \\ 0 & R_{\min} \leq R_{v,i} \leq R_{\max} \\ -1 & R_{v,i} > R_{\max} \end{cases} \quad (27)$$

式中,  $R_{\min}$  和  $R_{\max}$  分别为系统中虚拟阻抗允许设计的最小值和最大值。

由多代理协议的收敛性可知, 各个 DG 的  $\Delta R_{v,i,r}$  在系统稳态时相等。当某个 DG 的虚拟阻抗值小于允许的最小值时,  $f(R_{v,i})$  输出为 1, 由电压的协同机制可知, 此时  $\Delta R_{v,i,r}$  增大, 各个 DG 的虚拟阻抗值增加; 当某个 DG 的虚拟阻抗值大于允许的最大值时,  $f(R_{v,i})$  输出为 -1, 此时  $\Delta R_{v,i,r}$  减小, 各个 DG 的虚拟阻抗值减小。最终, 各个 DG 的虚拟阻抗值将动态的限定在一定范围, 避免一些极端情况发生。

### 4 仿真分析

为了验证本文提出的控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了直流微电网的仿真模型, 其中直流微电网的电路结构和通信拓扑如图 1 所示。系统包含三个直流分布式电源, 两个公共负荷。在本仿真系统中, 仿真步长为  $2e-5s$ , 同时为了更好地模拟实际的电网情况, 各个多代理系统的通信速率限制在 100Hz, 即每 10ms 接收/发送一次信息。直流微电网的电路参数见表 1。多代理分布式控制系统参数见表 2。

表 1 直流微电网电路参数

Tab. 1 Parameters of DC microgrid

| 参数                 | 数值  | 参数                 | 数值  |
|--------------------|-----|--------------------|-----|
| 母线电压/V             | 800 | 负载 1/ $\Omega$     | 100 |
| 负载 2/ $\Omega$     | 100 | $R_{line1}/\Omega$ | 0.2 |
| $R_{line2}/\Omega$ | 0.4 | $R_{line3}/\Omega$ | 0.3 |
| $R_{line4}/\Omega$ | 0.2 |                    |     |

表 2 控制系统参数

Tab. 2 Parameters of controllers

| 参数        | 数值        | 参数                 | 数值       |
|-----------|-----------|--------------------|----------|
| 电流环 PI    | [0.01, 5] | 电压环 PI             | [0.5, 5] |
| $k_1$     | 3         | $R_{v,1}^*/\Omega$ | 1        |
| $k_2$     | 2         | $R_{v,2}^*/\Omega$ | 1.5      |
| $k_3$     | 1         | $R_{v,3}^*/\Omega$ | 3        |
| $C_{1,1}$ | 5         | $C_{v,r}$          | 5        |
| $C_{1,2}$ | 7.5       | $R_{\min}/\Omega$  | 1        |
| $C_{1,3}$ | 15        | $R_{\max}/\Omega$  | 10       |
| $C_v$     | 5         |                    |          |

#### 4.1 负荷扰动

仿真中, 起初负载 1 离线, 只有负载 2 在线。三个 DG 的输出电流比例设置为 3:2:1。系统启动时, 0~10s 期间, 二次控制系统离线, 此时直流微电网由下垂控制策略控制; 10s 时电流协同控制和虚拟阻抗协同控制器使能; 20s 时电压恢复协同控制使能; 30s 时负载 1 接入母线; 40s 时负载 1 从母线切除, 各个 DG 的输出电流和电压波形如图 4 和图 5 所示。

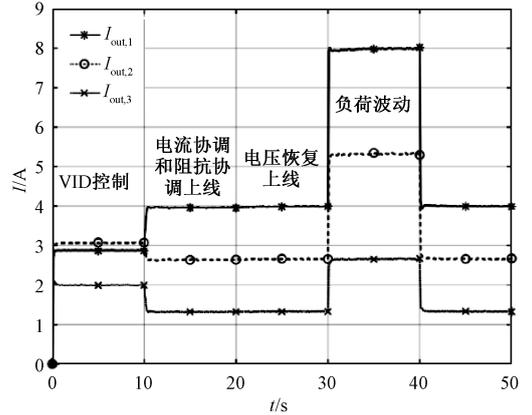


图 4 输出电流波形

Fig. 4 Waveforms of output currents

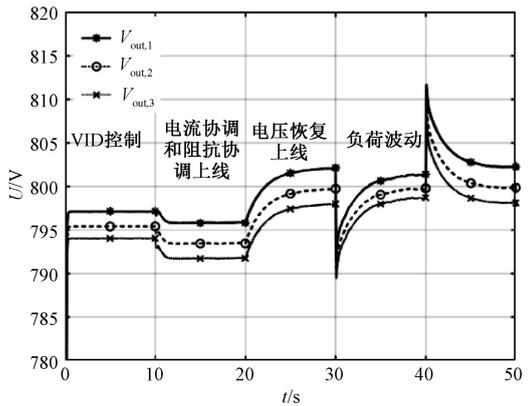


图 5 输出电压波形

Fig. 5 Waveforms of output voltage

从图 4 可以看出, 在控制策略只有下垂控制时, 直流微电网中的各个 DG 的输出电流此时由于受到线路阻抗的影响, DG1、DG2 和 DG3 的输出电流分别为 2.88A、3A 和 2A。距离设计的目标输出差距明显。在电流协同控制和虚拟阻抗协同控制器使能后, 系统通过调整各个 DG 的虚拟阻抗实现了输出电流的精确均分, 三个 DG 的输出电流分别为 3.96A、2.63A 和 1.32A。结合图 5 中的电压波形, 可以看出此时由于系统中的虚拟阻抗的跌落, 在电压协同控制器使能后, 各个 DG 的输出电压得到了

一定幅值的抬升,此时三个 DG 的输出电压分别为 802.3V、799.6V 和 798V,平均电压恢复至设定的额定值。30s 时由于负载 1 接入,系统的负荷提高了一倍,从电流和电压波形中可以看出,此时电流较快地到达稳态点附近,各个 DG 的输出电压出现了一定幅值的跌落,随后在分布式电压恢复控制器的调节下恢复至额定电压。40s 时负荷向下波动。

#### 4.2 虚拟阻抗协同对比

为了更好地对比有无虚拟阻抗协同控制策略下的效果,在仿真中,系统的下垂系数初始值设置为  $0.5\Omega$ 、 $0.75\Omega$  和  $1.5\Omega$ 。

0~10s 时系统工作在下垂模式,10s 时二次控制系统使能,系统此时进行均流、电压恢复和阻抗协调操作。20s 时,二次控制系统由于故障下线,此时系统工作在下垂控制中,但由于二次控制系统对于虚拟阻抗的补偿存在,此时系统依然能够维持电流均分状态不变,在 30s 时,此时负荷 1 接入系统。

图 6 和图 7 为存在阻抗协同控制策略下的输出电流和虚拟阻抗图。由图 7 可以看出,由于虚拟阻抗补偿策略的存在,各个 DG 的虚拟阻抗被限制在设定的范围之内,在二次控制系统故障时,由于此时的阻抗设置更加合理,分别为:  $1\Omega$ 、 $2.66\Omega$  和  $5.76\Omega$ ,负荷波动后各个 DG 的输出电流分别为:  $9.65A$ 、 $4.64A$ 、 $2A$ 。由于没有均流控制策略的存在,此时各个 DG 的电流不再均分,但依然具有一定的分担精度,同时各个 DG 在负荷波动下具有一定的动态性能。

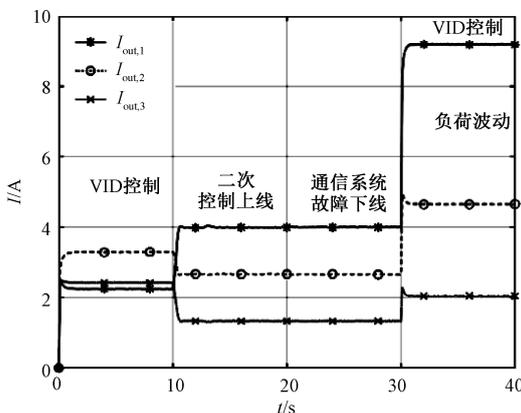


图 6 有虚拟阻抗协同下输出电流波形

Fig. 6 Current waveforms with virtual impedance coordination

图 8 和图 9 为不存在阻抗协同策略下的电流输出和阻抗值,由图 9 中可以看出,在二次控制下, DG1 的虚拟阻抗值被调整为了负值,而其两个 DG

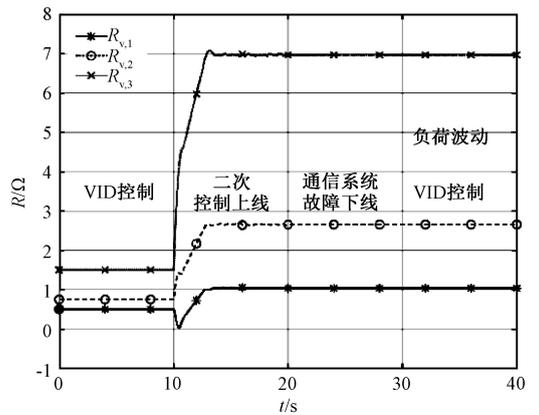


图 7 有虚拟阻抗协同下虚拟阻抗值

Fig. 7 Virtual impedance value with virtual impedance coordination

的虚拟阻抗值为正值,分别为:  $-0.1\Omega$ 、 $0.95\Omega$  和  $3.57\Omega$ ,这显然与下垂控制的反馈逻辑相悖。在二次控制系统故障下,负荷波动后的电流值为:  $11.4A$ 、 $3A$  和  $1.45A$ ,相比图 6 中的结果,显然图 6 中的分担效果更好。同时由图 8 可以看出负荷波动时各个 DG 的电流具有更大的超调。

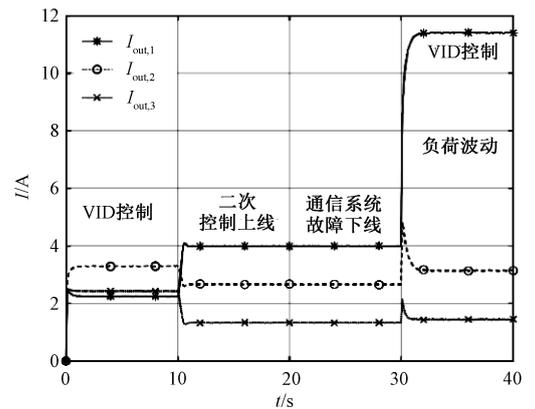


图 8 无虚拟阻抗协同下输出电流波形

Fig. 8 Current waveforms without virtual impedance coordination

## 5 实验结果

为了更好地验证控制策略的有效性,搭建了基于 RT-LAB 的硬件在环仿真实验,实验平台如图 10 所示。其中直流微电网和变流器运行在 RT-LAB 中,控制策略运行在由 STM32F407ZG 组成的控制器中,RT-LAB 向各个控制器发送电压电流信号,控制器向其发送控制指令信号。各个控制器通过以太网连接,通信拓扑图如图 1 所示,通信速率与第 4 节中的仿真相同都为 10ms/次。

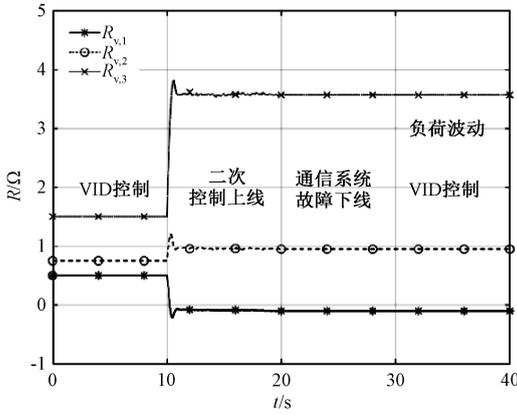


图9 无虚拟阻抗协同下虚拟阻抗值

Fig.9 Virtual impedance values without virtual impedance coordination

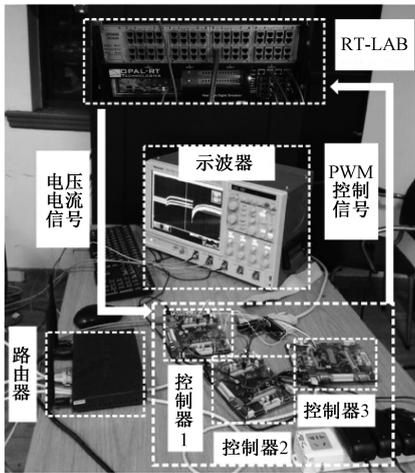


图10 硬件在环实验平台

Fig.10 On-loop experimental platform hardware

在此实验平台上,验证了控制策略的有效性,推荐控制策略电压波形和电流波形如图11和图12所示,实验过程同仿真类似;同时对比了有无虚拟阻抗协同策略下的电流波动,如图13和图14所示,实验过程与图6和图8中类似,在此不再赘述。从图13和图14的对比中可以看出,在虚拟阻抗策略的控制下,系统的虚拟阻抗分布更加合理,在通信故障下,负荷的电流分担更加准确。

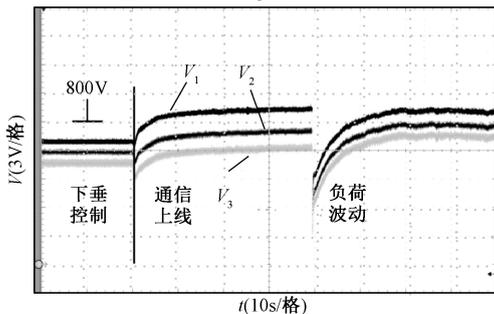


图11 推荐控制策略电压波形

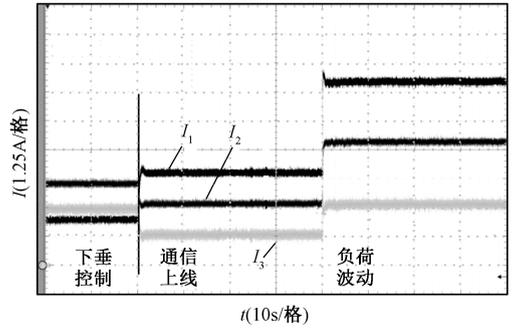


图12 推荐控制策略电流波形

Fig.12 Current waveforms of recommended control strategy

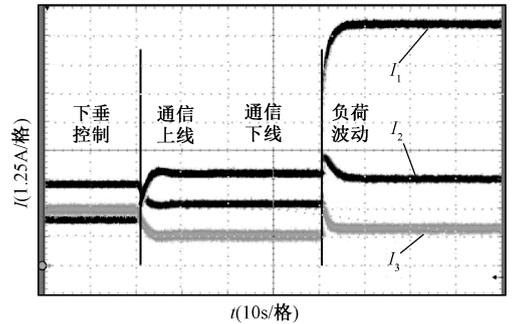


图13 无虚拟阻抗协同下输出电流

Fig.13 Output current without virtual impedance coordination

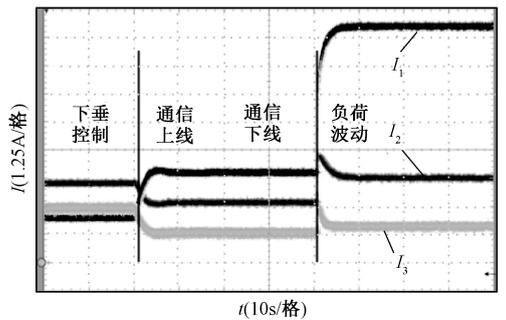


图14 有虚拟阻抗协同下输出电流

Fig.14 Output current with virtual impedance coordination

值得注意的是,在实验中由于控制延时与噪声的影响,为保证系统的稳定运行,系统的协同参数较仿真系统小,其他参数与仿真参数相同,所以收敛时间稍长。

### 6 结论

本文提出了一种基于有限时间收敛的直流微电网协调控制策略。在直流微电网中各个DG的底层控制系统为传统的下垂控制。在二次控制系统中设计三个分布式协同控制策略,首先,各个DG通过获取邻接节点的输出电流值,根据其差值调整各自的

下垂系数(虚拟阻抗)来调整各自的输出电流,最终使得各个 DG 的电流达到设计的分担比例;其次,各个 DG 通过一个平均值估计器估计系统整体的电压平均值,并将此信息发送自邻接节点,通过有限时间收敛协议在有限时间内使各自的估计值收敛一致,并根据估计值与电压额定值的差异调整各自的输出电压,最终使得各个 DG 的输出电压平均值恢复至额定电压;最后,考虑到系统在二次控制系统故障下系统的稳定性,设计了一种虚拟阻抗的系统控制机制,通过各个 DG 判断其虚拟阻抗值是否满足限定范围,通过分布式控制使得每个 DG 的虚拟阻抗值都运行在限定范围内,提高了系统在特殊情况下的稳定性。最后,分别搭建了 MATLAB/Simulink 仿真模型,和基于 RT-LAB 的硬件在环实验,在低通信下验证了控制策略的有效性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 韩民晓,王皓界 (Han Minxiao, Wang Haojie). 直流微电网—未来供用电领域的重要模式 (DC microgrid—the important mode in the field of power supply and consumption) [J]. 电气工程学报 (Journal of Electrical Engineering), 2015, 10 (5): 1-9.
- [ 2 ] Tomislav Dragičević, Lu X, Vasquez J C, et al. DC microgrids-part I: A review of control strategies and stabilization techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (7): 4876-4891.
- [ 3 ] 蔡冰倩,贾利虎,朱永强,等 (Cai Bingqian, Jia Lihu, Zhu Yongqiang, et al.). 直流微电网电压等级序列选择的影响因素研究 (Research on influence factor of voltage class series option in DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 45-51.
- [ 4 ] 王皓界,韩民晓,Josep M. Guerrero (Wang Haojie, Han Minxiao, Josep M. Guerrero). 基于 I-V 下垂控制的直流微电网动态特性分析与改善 (Analysis and improvement of DC microgrid dynamic performance based on I-V droop control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 80-88.
- [ 5 ] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等 (Zhu Shanshan, Wang Fei, Guo Hui, et al.). 直流微电网下垂控制技术综述 (Overview of droop control in DC microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (1): 72-84, 344.
- [ 6 ] Adhikari S, Tang Y, Wang P. Secondary control for DC microgrids: A review [A]. 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT) [C]. 2016. 1-6.
- [ 7 ] 李鹏,韩鹏飞 (Li Peng, Han Pengfei). 含高密度可再生能源的交流混合微网模糊优化运行 (Fuzzy optimal operation of hybrid AC/DC microgrid with high-density renewable energy sources) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 63-70.
- [ 8 ] 杜少飞,谢文超,朱永强,等 (Du Shaofei, Xie Wen-chao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 30-38.
- [ 9 ] 寇凌峰,李洋,吴鸣,等 (Kou Lingfeng, Li Yang, Wu Ming, et al.). 分布式微电网电压恢复协调控制策略 (Coordinated control strategy for voltage recovery in distributed microgrids) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 65-72.
- [ 10 ] 邢志斌,韦钢,贺静,等 (Xing Zhibin, Wei Gang, He Jing, et al.). 基于多代理技术的直流配电网电压控制方法 (Multi-agent Technology based voltage control method for DC distribution network) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (14): 86-92.
- [ 11 ] 顾伟,薛帅,王勇,等 (Gu Wei, Xue Shuai, Wang Yong, et al.). 基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制 (Analysis on relationship between electricity wholesale market and retail market based on system dynamics method) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2016, 40 (24): 49-55, 84.
- [ 12 ] Lu X, Lu R, Chen S, et al. Finite-time distributed tracking control for multi-agent systems with a virtual leader [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2013, 60 (2): 352-362.
- [ 13 ] Xiao Feng, Wang Long, Chen Jie, et al. Finite-time formation control for multi-agent systems [J]. Automatica, 2009, 45 (11): 2605-2611.
- [ 14 ] 谢文强,韩民晓,王皓界,等 (Xie Wenqiang, Han Minxiao, Wang Haojie, et al.). 基于虚拟电压的直流微电网多源协调控制策略 (Multi-source coordinated control strategy of DC micro-grid based on virtual voltage) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (5): 1408-1418.
- [ 15 ] 支娜,张辉,肖曦 (Zhi Na, Zhang Hui, Xiao Xi). 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究

- (Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (3): 31-39.
- [16] Wang P, Lu X, Yang X, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (9): 6658-6673.
- [17] Lee Gi-Young, Ko Byoung-Sun, Cho Jintae, et al. A distributed control method based on a voltage sensitivity matrix in DC microgrids with low-speed communication [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10.1109/TSG.2018.2835811.
- [18] 谢永流, 程志江, 李永东, 等 (Xie Yongliu, Cheng Zhijiang, Li Yongdong, et al.). 引入虚拟阻抗的并联逆变器新型下垂控制策略 (New droop control strategy for parallel inverter with virtual impedance) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (3): 22-25.
- [19] Zhang H, Kim S, Sun Q, et al. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8 (4): 1749-1761.
- [20] Spanos D P, Olfati-Saber R, Murray R M. Dynamic consensus on mobile networks [A]. The 16th IFAC World Congress [C]. Prague, Czech, 2005. 1-5.

## Finite-time multi-agent coordinated control for DC microgrids

SUN Yong<sup>1</sup>, LIU Zhi-jun<sup>1</sup>, LI Zhen-yuan<sup>1</sup>, LI Bao-ju<sup>1</sup>, HU Ya-long<sup>2</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>

(1. State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In this paper, a secondary control strategy is designed for DC microgrids. The controller can achieve accurate current sharing and voltage average amplitude restoration using the finite-time multi-agent control protocol. Each distributed generator (DG) only needs the information of its neighbors. The current output of each DG is adjusted with the virtual impedance and the voltage is controlled by adjusting its reference voltage. In addition, a coordinated controller is proposed which is used to improve the dynamic performance of the output current by adjusting the virtual impedance. And the control strategy is verified in MATLAB/Simulink and RT-LAB with hardware in loop in which the low communication rate is applied.

**Key words:** DC microgrid; finite-time consensus; distributed control; virtual impedance; low communication rate