

直流微电网电压电流分布式控制方法研究

刘胜

(国家电网有限公司,北京 100031)

摘要:电压和电流平衡对于保证直流微电网正常运行具有重要作用。为此提出了一种新的分布式电压、电流控制方法,实现了直流微电网的均流和均压调节。所考虑的直流微电网由多个分布式发电单元(DGU)通过阻性输电线互连而成,每个DGU包括一个通用电源,通过DC-DC Buck变换器提供负载电流。所提出的分布式控制方案独立于受控微电网的初始条件,实现了均流和平均电压调节,此外所提出的方案只需要测量电网产生的电流,并且与微电网参数和通信网络的拓扑结构无关。最后通过仿真实验进行了验证,仿真结果表明,所提出的算法具有良好的全局收敛性,研究结果可为直流微电网控制提供参考。

关键词:分布式控制;网络控制;通信控制;直流微电网

中图分类号:TM7 **文献标识码:**B **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22585

Study on Distributed Control of Voltage and Current in DC Micro-grid

LIU Sheng

(State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: Voltage and current balance plays an important role in ensuring the normal operation of DC micro-grid. Therefore, a new distributed voltage and current control method was proposed to realize the current sharing and voltage sharing regulation of DC micro-grid. The considered DC micro-grid was composed of several distributed generation units (DGU) interconnected by resistive transmission lines. A general energy source was contained in each DGU and load current was provided through DC-DC Buck converter. The proposed distributed control scheme was independent of the initial conditions of the controlled micro-grid, and current sharing and average voltage regulation were realized. In addition, the proposed scheme only needs to measure the current generated by the grid, and is independent of the parameters of the micro-grid and the topology of the communication network. Finally, the simulation experiment was carried out to verify the proposed scheme. Simulation results show that the proposed algorithm has good global convergence. The research results can provide reference for DC micro-grid control.

Key words: distributed control; network control; communication control; direct current (DC) micro-grid

微电网是相对较小的电网,其中的负载、电源和储能系统需要仔细微调^[1]。通常微电网是交流(alternating current, AC)或直流(direct current, DC)网络中的一种,其中的每种类型都需要专用的控制策略^[2-3]。基于交流输电网的丰富运行经验,目前人们已经建成适应于交流微电网的控制策略^[4-5],但直流微电网的控制仍然处于探索阶段。通过DC-DC变换器可将多个电源和负载(例如光伏面板、电池、电子设备)直接连接到直流微电网,从而使直流微电网比交流微电网更具高效

性,其中直流微电网的电压、电流控制至关重要。

微电网的控制主要是确保负载处的电压在所需的值附近,并且在各种电源之间公平地分配电网功率^[6-11]。目前为实现这一需求,可通过设计电流共享型(按照比例分配)控制器,将负载需要的总电流按照比例分配给各种电源。通常分级控制方法可以实现这两个目标,但分级控制已经不足以应对为不断变化的负载提供快速响应的需求,因此分布式电流控制正逐渐成为研究人员关注的焦点,特别是针对电流(电源)共享的控

基金项目:国家电网有限公司2019年管理咨询项目(SGZB0000QXWT1900694)

作者简介:刘胜(1983—),男,硕士,高级工程师,Email:schumi1123@1263.com

制方法^[12-13]。实际上由于网络中的电流与电压紧密相关,因此无法自由调节电压,但仍期望适当分配电源产生的电流,为了实现这一目的,通常放宽电压控制要求,仅要求将整个微电网上的平均电压调节到全局电压的设定值即可。本文也采用相同的方法,即“平均电压调节法”、“全局电压调节法”或称为“电压平衡法”^[14-15]。

可见,尽管直流微电网的分布式控制方案的设计和分析已引起了大量关注,但仍然缺乏可同时实现电压调节和电流(功率)共享的控制方法。为此本文从直流微电网拓补结构出发,提出了一套直流微电网的电压、电流控制模型,设计了一套分布式控制方案,仅需测量电源提供的电流,以及通过通信网络交换分布式发电单元(distributed generation unit, DGU)的电流测量值,即可实现平均电压调节。本文从理论分析出发推导和分析了算法的稳定性,最后通过仿真实验验证了本文提出的微电网控制方法的有效性。研究结果可为直流微电网的电压、电流控制提供参考。

1 直流微电网模型

1.1 微电网系统系统模型

本文的研究对象是一个典型的直流微电网系统,该微电网由 n 个 DGU 组成,这些 DGU 通过 m 个阻性(RL)电力线相互连接,如图 1 所示。

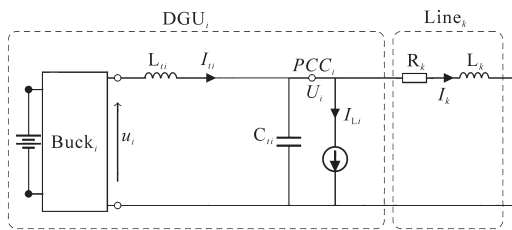


图1 DGU系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of DGU system

图1中各个字符的意义如表1所示。

DGU中的电源由直流电压源表示,该直流电压源通过DC-DC降压变压器为本地负载供电。本地直流负载连接到所谓的公共耦合点(point of common coupling, PCC),假设电流需求 I_{Li} 无法测量。描述DGU的动态行为的方程为

$$\begin{cases} L_{ii}\dot{I}_{ii} = -U_i + u_i \\ C_{ii}\dot{U}_i = I_{ii} - I_{Li} - \sum_{k \in \varepsilon_i} I_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_i 为入射到DGU $_i$ 的一组电源线;控制输入 u_i

表1 DGU变量统计表

Tab.1 Statistical table of DGU variables

变量	
I_{ii}	发电电流
U_i	负载电压
I_k	线电流
$i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$	变量的数目
$k \in \{1, 2, \dots, m\}$	变量的数目
t	时间
L_{ii}	滤波电感
C_{ii}	并联电容
R_k	线路电阻
L_k	线路电感
输入	
u_i	控制输入
I_{Li}	未知电流需求

为降压变压器的输出电压。

从DGU $_i$ 到DGU $_j$ 的电流由 I_k 表示,其动态由下式给出:

$$L_{ii}\dot{I}_k = (U_i - U_j) - R_k I_k \quad (2)$$

式(1)、式(2)中的各个变量与参数的意义如表1所示。整个直流网络通过互联无向图 $\xi=(v, \varepsilon)$ 表示。其中 $v=\{1, 2, \dots, n\}$, 表示DGUS图中的边界线; $\varepsilon=\{1, 2, \dots, m\}$, 表示DGUS图中的电力线。网络的拓扑结构通过关联矩阵 β 进行描述,其中 $\beta \in R^{n \times m}$, 边 k 的末端任意用 $a+$ 和 $a-$ 标记, β 的项由下式给出:

$$\beta = \begin{cases} +1 & i \text{ 为 } k \text{ 的正极性端子} \\ -1 & i \text{ 为 } k \text{ 的负极性端子} \\ 0 & \text{其他情况} \end{cases} \quad (3)$$

因此可以将整个微电网的数学模型写成:

$$\begin{cases} L_i \dot{I}_i = -U + u \\ C_i \dot{U} = I_i + \beta I - I_L \\ L \dot{I} = -\beta^T U - R I \end{cases} \quad (4)$$

式中: $I_i, U, I_L, u \in R^n; I \in R^m; C_i, L_i \in R^{n \times n}, R, L \in R^{m \times m}$, 均为正定对角矩阵,例如: $C_i = \text{diag}(C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in})$ 。

1.2 电流、电压控制模型

本文制定了直流微电网中的两个常见控制目标。首先对于给定的需求 I_L 和常数输入 \bar{u} , 系统的稳态解 $(\bar{I}, \bar{U}, \bar{I})$ 满足:

$$\begin{cases} \bar{U} = \bar{u} \\ I_L - \bar{I} = \beta \bar{I} \\ \bar{I} = -R^{-1} \beta^T \bar{U} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表示电力需求的平衡状态,即总发电量与

总电力需求量相等。为了避免电源应力过大并提高发电效率,通常需要网络在所有各个DGU中按其相应能源的发电量成比例地共享(按比例分配电流)。对于所有*i, j*,该期望可以被公式化为 $w_i \bar{I}_{ii} = w_j \bar{I}_{jj}$,其中 w_i 为相对较大的值,将对应于DGU的相对较小的发电容量,由此可导出与发出的电流 I_i 的稳态值有关的第一个控制目标,即控制目标1(按比例分配电流):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} I_i(t) = \bar{I}_i = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{i}_i^* \quad (6)$$

其中,对于所有*i* ∈ *v*以及 \mathbf{i}_i^* ,有 $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, \dots, w_n)$, $w_i > 0$ 。对于电流平衡状态 $\bar{I}_i = I_L$,必然有 $\mathbf{i}_i^* = I_L / \mathbf{W}^{-1}$ 。在引入第二个控制目标之前,假设对于每个DGU,都存在一个参考电压 U_i^* ,即对于所有*i* ∈ *v*,存在参考电压 U_i^* (假设1)。

总的来说,要实现控制目标1不需要电压达到稳定状态($\bar{U} = U^*$),由式(5)和式(6)可知,稳定状态下的电压需要满足 $\beta \mathbf{R}^{-1} \beta^T \bar{U} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{i}_i^* - I_L$,然而这就允许以相同的恒定值改变所有稳态电压,因此本文的控制目标是调控平均电压,其中 U 的加权平均值等于所需参考电压 U^* 的加权平均值。按照发电量最大的电源确定电网电压的标准做法,选择权重 $1/w_i$ 导出第二个控制目标,即控制目标2(平均电压调节):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{W}^{-1} U(t) = \mathbf{W}^{-1} \bar{U} = \mathbf{W}^{-1} U^* \quad (7)$$

1.3 微电网分布式控制模型

在提出实现1.2节中讨论的目标的分布式控制函数之前,对可测量变量进行以下假设(假设2):假设在变压器*i* ∈ *v*处,发电产生的电流 I_{ii} 是可测量的。此时既不需要测量电压 U ,也不需要系统参数的信息。现在,我们以临时方式提出一种可能的控制方案,并在本节后面提供其原理。为此,考虑以下形式的节点*i* ∈ *v*处的分布式控制器:

$$\begin{cases} T_{\theta i} \dot{\theta}_i = - \sum_{j \in N_i^{\text{com}}} \gamma_{ij} (w_i I_{ii} - w_j I_{jj}) \\ T_{\varphi i} \dot{\varphi}_i = -\varphi_i + I_{ii} \\ u_i = -K_i (I_{ii} - \varphi_i) + \\ w_i \sum_{j \in N_i^{\text{com}}} \gamma_{ij} (\theta_i - w_j \theta_j) + U_i^* \end{cases} \quad (8)$$

其中,参数 $T_{\theta i}, T_{\varphi i}, K_i \in \mathbf{R} > 0$,允许对瞬态响应进行适当的调谐。

数据集 N_i^{com} 是通过节点*i*相连的通信网络,网络连线权重为 $\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \in \mathbf{R} > 0$,由此实现了控制器的分布式布置,因为它规定了在相邻节点 I_i 和 θ 之间交换信息,与微电网的拓扑结构类似,整个

通信网络由连通无向图表示为 $\xi^{\text{com}} = (\mathbf{v}^{\text{com}}, \mathcal{E}^{\text{com}})$,其中 $\mathbf{v}^{\text{com}} = \mathbf{v}, \mathcal{E}^{\text{com}} = \{1, \dots, m_c\}$,代表了DGU之间的通信连接, m_c 为通信网络中的节点数,通信网络拓扑由其对应的关联矩阵 β^{com} 进行描述,其中 $\beta^{\text{com}} \in \mathbf{R}^{\text{com}}$,之后对于所有的*i* ∈ *v*,控制方程可写为

$$\begin{cases} T_{\theta} \dot{\theta} = -L^{\text{com}} \mathbf{W} I_i \\ T_{\varphi} \dot{\varphi} = -\varphi + I_i \\ u = -K(I_i - \varphi) + \mathbf{W} L^{\text{com}} \theta + U^* \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$L^{\text{com}} = \beta^{\text{com}} \Gamma (\beta^{\text{com}})^T$$

式中: $T_{\theta}, T_{\varphi}, K \in \mathbf{R}^{n \times n}$,为正定对角矩阵; L^{com} 为与通信网络关联的(加权)拉普拉斯矩阵; $\Gamma \in \mathbf{R}^{m_c \times m_c}$,为正定对角矩阵边缘上的权重。

连接式(4)所示的微电网与式(9)所示的分布式控制器,得出整个闭环系统:

$$\begin{cases} L_i \dot{I}_i = -U - K(I_i - \varphi) + \mathbf{W} L^{\text{com}} \theta + U^* \\ C_i \dot{U} = I_i + \beta I - I_L \\ L \dot{I} = -\beta^T U - R I \\ T_{\theta} \dot{\theta} = -L^{\text{com}} \mathbf{W} I_i \\ T_{\varphi} \dot{\varphi} = -\varphi + I_i \end{cases} \quad (10)$$

首先需要证明方程组(10)的稳态解总是存在的,即在假设1和假设2同时满足的条件下,对于方程组(10)存在一组稳态解 $(\bar{I}_i, \bar{U}, \bar{I}, \bar{\theta}, \bar{\varphi})$,满足:

$$\begin{cases} 0 = -\bar{U} - K(\bar{I}_i - \bar{\varphi}) + \mathbf{W} L^{\text{com}} \bar{\theta} + U^* \\ 0 = \bar{I}_i + \beta \bar{I} - I_L \\ 0 = -\beta^T \bar{U} - R \bar{I} \\ 0 = -L^{\text{com}} \mathbf{W} \bar{I}_i \\ 0 = -\bar{\varphi} + \bar{I}_i \end{cases} \quad (11)$$

证明:对于式(11)有 $\bar{I}_i = I_L, \bar{I}_i = \alpha \mathbf{W}^{-1}$,对于任意取值的 α ,满足下式:

$$\bar{I}_i = \sigma_w^{-1} \mathbf{W}^{-1} I_L \quad (12)$$

其中

$$\sigma_w^{-1} = \mathbf{W}^{-1}$$

由式(11)可得:

$$\bar{\varphi} = \bar{I}_i \quad (13)$$

将式(12)代入式(11)可得:

$$\beta \bar{I} = L_w \mathbf{W} I_L \quad (14)$$

其中

$$L_w = \sigma_w^{-1} \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{W}^{-T}$$

如果微电网 ξ 的结构是树状(例如 $m=n-1$),那么拉普拉斯矩阵 $\beta^T \beta$ 的逆存在,并且解 \bar{I} :

$$\bar{I} = (\beta^T \beta)^{-1} \beta^T L_w \mathbf{W} I_L \quad (15)$$

当微电网 ξ 不是树状结构时,即 $m > n$ 时, β 可以重写为 $\beta = [\beta_1, \beta_2]$,其中 $\beta_1 \in \mathbf{R}^{n \times (n-1)}$,是网络 ξ 的生成树的最小关联矩阵,此时式(15)可以重写为

$$\begin{cases} \bar{I} = \begin{bmatrix} \bar{I}_r \\ 0 \end{bmatrix} \\ \bar{I}_r = (\beta^T \beta)^{-1} \beta^T L_w W I_L \end{cases} \quad (16)$$

因此对于任何处于连接状态的图 ξ ,都存在有对应的解 \bar{I} 。将式(11)的两侧乘以 W 可得 $W^{-T}U = W^{-T}U^*$ 。与式(11)类似,可得:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \beta^T \\ W^{-T} \end{bmatrix}}_Z \bar{U} = \begin{bmatrix} -R\bar{I} \\ W^{-T}U^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

由于矩阵 Z 是列满秩,因此广义逆矩阵 Z^s 以左逆的形式出现在公式中,如下式所示:

$$\bar{U} = Z^s \begin{bmatrix} -R\bar{I} \\ W^{-T}U^* \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(13),式(11)可改写为

$$L^{\text{com}} \bar{\theta} = W^{-1} (\bar{U} - U^*) \quad (19)$$

考虑非奇异矩阵 $u = [1/\sqrt{n}, \tilde{u}]$,其中 $\tilde{u} \in R^{n(n-1)}$,是矩阵 u 的酉矩阵($u^{-1}=u^T$),则可将式(19)改写为

$$\begin{aligned} u^T L^{\text{com}} u u^T \bar{\theta} &= u^T W^{-1} (\bar{U} - U^*) \Leftrightarrow \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \tilde{u}^T L^{\text{com}} \tilde{u} \end{bmatrix} u^T \bar{\theta} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{n}} W^{-T} (\bar{U} - U^*) \\ \tilde{u}^T W^{-1} (\bar{U} - U^*) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

其中 $W (\bar{U} - U^*) = 0$

可得:

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= u \begin{bmatrix} \beta \\ (\tilde{u}^T L^{\text{com}} \tilde{u})^{-1} \tilde{u} W^{-1} (\bar{U} - U^*) \end{bmatrix} \\ &= \beta / \sqrt{n} + \tilde{u} (\tilde{u}^T L^{\text{com}} \tilde{u})^{-1} \tilde{u}^T W^{-1} (\bar{U} - U^*) \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\beta \in R$ 。

在给定电流值 I_L 的条件下,对于变量 $\bar{I}, \bar{\varphi}, \bar{I}, \bar{U}$ 和 $\bar{\theta}$ 可根据式(12)、式(13)、式(15)、式(16)、式(18)、式(21)求得。下一节中本文将重点讨论所提出的控制方案和控制微电网时的指数稳定性。

2 结果与分析

2.1 算法稳定性分析

本节重点讨论式(10)得到的解能否收敛至稳定状态,实现电流分配(目标1)和平均电压调节(目标2)。即需要证明保持假设1和假设2成立的条件下,方程组(10)的解($\bar{I}', \bar{\varphi}', \bar{I}', \bar{U}'$ 和 $\bar{\theta}'$)能够以指数形式收敛,实现电流分配(目标1)和电压平衡(目标2)。证明考虑发电量递增的情况:

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2} (I_t - \bar{I}_t)^T L_t (I_t - \bar{I}_t) + \\ &\quad \frac{1}{2} (U - \bar{U})^T C_t (U - \bar{U}) + \\ &\quad \frac{1}{2} (I - \bar{I})^T L (I - \bar{I}) + \\ &\quad \frac{1}{2} (\theta - \bar{\theta})^T T_\theta (\theta - \bar{\theta}) + \\ &\quad \frac{1}{2} (\varphi - \bar{\varphi})^T T_\varphi K (\varphi - \bar{\varphi}) \end{aligned} \quad (22)$$

其中, $(\bar{I}, \bar{\varphi}, \bar{I}, \bar{U}, \bar{\theta})$ 为方程组(10)的稳态解,同时满足式(11),由此可以看出式(22)中的 S 是无界的,并且很快收敛至 $(\bar{I}, \bar{\varphi}, \bar{I}, \bar{U}, \bar{\theta})$ 。另外计算结果表明 S 的求解应当满足:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= -(I - \bar{I})^T R (I - \bar{I}) - \\ &\quad (I_t - \varphi)^T K (I_t - \varphi) \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

作为中间结果,可以得出式(10)所示系统的所有解都是有界的。根据LaSalle不变性原理,对式(10)的解逼近完全包含在集合中的最大不变集: $\gamma = \{I_t, V, I, \theta, \varphi, I = \bar{I}, I_t = \varphi\}$ 。在这个集合上 I 是一个常数,例如: $I = \bar{I} = \bar{I}'$ 。此外在集合 γ 上,方程组(10)还满足:

$$\begin{cases} L_t \dot{I}_t = -U + W L^{\text{com}} \theta + U^* \\ C_t U = I_t + \beta \bar{I} - I_L \\ 0 = -\beta^T U - R \bar{I} \\ T_\theta \dot{\theta} = -L^{\text{com}} W I_t \\ T_\varphi \dot{\varphi} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

由式(24)可知,在最大不变集上 φ 是常数,即 $\varphi = \bar{\varphi}'$ 。由于在集合 γ 中, $I_t = \varphi$,所以在最大不变集上, I_t 也是常数,即。因此式(24)的右边是一个常数向量,当 $\dot{\theta} \neq 0$ 时, θ 会变得无界,与方程组(10)建立的解有界性相矛盾。因此在最大不变集上 θ 是常数,即 $\theta = \bar{\theta}'$ 。由 $0 = -L^{\text{com}} W I_t'$ 可知实现了电流分配(目标1)。通过在式(24)两边乘以 W^{-T} ,并且在最大不变集上有 $\dot{I}_t = 0$,可导出 $W^{-T}U = W^{-T}U^*$,结合式(24),可得:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \beta^T \\ W^{-T} \end{bmatrix}}_Z U = \begin{bmatrix} -R\bar{I} \\ W^{-T}U^* \end{bmatrix} \quad (25)$$

由于式(25)中矩阵 Z 列满秩,因此在最大不变集上有:

$$U = Z^s \begin{bmatrix} -R\bar{I} \\ W^{-T}U^* \end{bmatrix} = \bar{U}' \quad (26)$$

由于在最大不变集上 $U = \bar{U}'$ 是一个常数,满

足 $\mathbf{W}^{-T}\bar{\mathbf{U}}' = \mathbf{W}^{-T}\mathbf{U}^*$, 因此电压平衡自动满足(目标2)。由此可得方程组(10)的解能够收敛至稳定状态 $(\bar{\mathbf{I}}', \bar{\boldsymbol{\varphi}}', \bar{\mathbf{I}}', \bar{\mathbf{U}}'$ 和 $\bar{\boldsymbol{\theta}}')$, 实现电流分配(目标1)和电压平均(目标2)。此外由于控制方程组是线性的, 所以方程组的解将按照指数规律收敛。

2.2 微电网仿真实验

为了验证本文提出的分布式一致性算法的有效性, 考虑由4个DGU组成的微电网, 如图2所示。

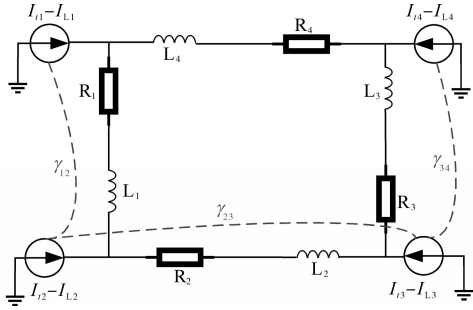
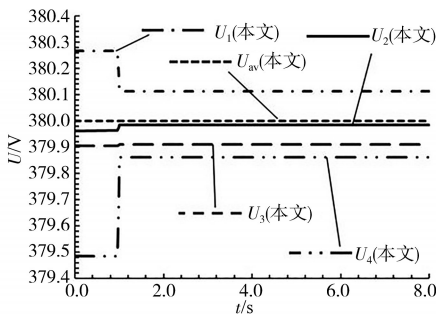


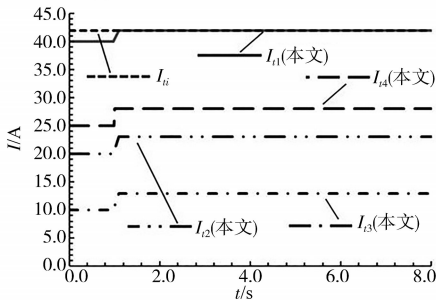
图2 4个DUG直流微电网示意图

Fig.2 Schematic diagram of four-DUG DC micro-grid

图2中的虚线是通信网络, DGU元件和线路的参数取文献[11]中表II和III的参数, 图中通信网络的连线的权重为 $\gamma_{12}=\gamma_{23}=\gamma_{34}=1 \times 10^2$ 。系统处于稳定状态时有电流初始值 $\mathbf{I}_{L_i}(0)=[30, 15, 30, 26]^T$ A, 系统由于存在电流需求, 引起的电流变化量为 $\Delta \mathbf{I}_{L_i}=[10, 7, -10, 5]^T$ A, 持续时间为1 s。利用本文提出的模型计算得到的电压和电流如图3所示。



(a)本文控制方法算得的电压时域波形



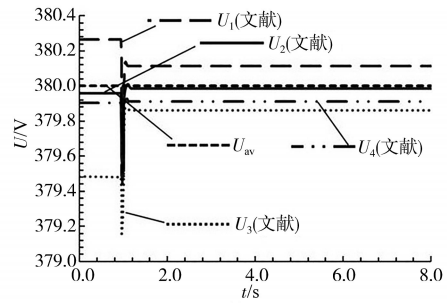
(b)本文控制方法算得的电流时域波形

图3 本文提出的电压电流计算结果

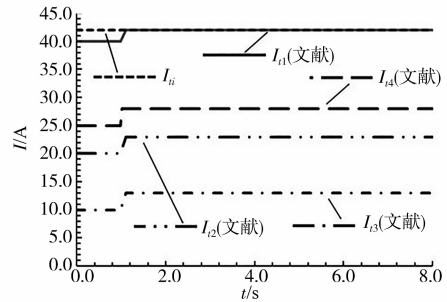
Fig.3 Calculation results of voltage and current presented in the paper

由图3可以看出, 通过本文设计的控制器进行电压调整, 可将电压的稳态加权平均值(U_{av}), 调整至相应的电压参考值的加权平均值(见目标2), 并且每个DGU产生的电流最终都收敛到了期望值, 从而实现电流的分配和共享(见目标1)。

为了便于与本文提出的模型进行比较, 图4为现有文献[11]的控制方法得到的电压、电流时域波形。



(a)现有控制方法算得的电压时域波形



(b)现有控制方法算得的电流时域波形

图4 文献[11]提出的电压电流计算结果

Fig.4 Calculation results of voltage and current proposed in reference [11]

图4为通过滑模(sliding mode, SM)控制器所得的结果^[11]。由图4中所示的 U_3 的电压随时间的变化的典型波形(所有其他DGU都存在类似的行为), 可见电压响应本身具有瞬态高频振荡的特征。由图4还可以看出, SM控制器产生的电流时域波形与本文得出的结果相似(见图3), 并且都能够收敛至期望值, 但电压出现了高频振荡, 而采用本文提出的模型时, 电压瞬态特性得到了明显改善(见图3)。这是因为本文提出的电压、电流控制器不需要测量电压值, 而现有的SM控制器不仅需要测量电压, 还需要计算电压的一阶和二阶导数, 对于电压存在测量噪声的情况, 很可能导致算法鲁棒性问题。

图5为本文提出的控制方法与现有方法在电压发生扰动的瞬间进行电压调控的时域波形对比。

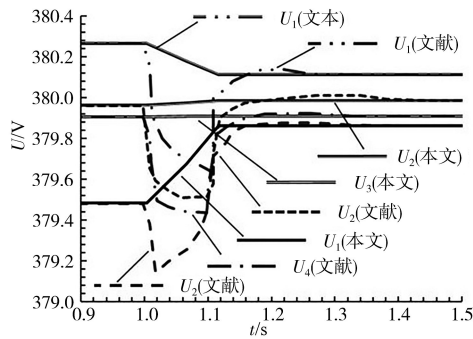


图5 瞬态时域响应对比

Fig.5 Comparison of transient time domain response

由图5可见,现有方法进行电压调整时,各个节点都将产生一定电压过冲,这是由图4所示的电压瞬态振荡引起的。采用本文提出的电压控制方法可以有效避免电压瞬态振荡问题,同时用较短的时间将电压调整至期望值。

表2为电压需求发生变化后,调整至期望电压所需的时间统计表。

表2 电压调整时间统计表

Tab.2 Statistical table of voltage adjustment time

电压编号		调整时间/s		时间差 $\Delta t/s$
文献[11]	本文	文献[11]	本文	
U_1	U_1	0.167	0.057	0.110
U_2	U_2	0.227	0.057	0.170
U_3	U_3	0.207	0.057	0.150
U_4	U_4	0.167	0.057	0.150
平均值		0.192	0.057	0.135

由表2统计结果可知,现有调整方法对各个节点进行电压调整时,各个节点所需的调整时间不同。相比现有控制方法,本文提出的电压控制方法可以实现各个节点电压的同步调整,同时调整速度比现有方法平均要快0.135 s。

3 结论

针对直流微电网的电压、电流控制问题,提出了一种在电流负载未知的直流微电网中,能够实现按照比例均流和平均电压调节的分布式控制方法,得到以下几个主要结论:

1) 本文提出的控制方法只需要测量微电网产生的电流,而不需要知道微电网的参数,提高了电网控制效率,减少了电信号噪声对微电网控制的影响。

2) 利用本文提出的方法,电压、电流控制方程的解可以从全局收敛到期望的稳定状态,解的收敛性独立于物理系统的初始条件和控制器状态,表明本文提出的方法可以适用于各种工况。

3) 与现有直流微电网电压、电流控制方法的对比结果表明,本文提出的方法可以有效改善电压瞬态特性,提高算法鲁棒性。仿真结果表明本文提出的电压控制方法可以实现各个节点电压的同步调整,同时调整速度比现有方法平均要快0.135 s。

参考文献

- [1] 郭伟,赵洪山.基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 1140-1151.
Guo Wei, Zhao Hongshan. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 1140-1151.
- [2] 张弛,曾杰,曾嵘,等.直流孤岛微电网的两级功率协同控制方法[J]. 电气传动, 2019, 49(12): 58-63.
Zhang Chi, Zeng Jie, Zeng Rong, et al. A two stage cooperative power control method for islanded DC microgrid [J]. Electric Drive, 2019, 49(12): 58-63.
- [3] 刘海涛,熊雄,季宇,等.直流配电网多微网系统集群控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7159-7167, 7489.
Liu Haitao, Xiong Xiong, Ji Yu, et al. Cluster control research of multi-microgrids system under DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7159-7167, 7489.
- [4] 刘子文,苗世洪,范志华,等.孤立交直流混合微电网双向AC/DC换流器功率控制与电压波动抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6225-6237.
Liu Ziwen, Miao Shihong, Fan Zhihua, et al. Power control and voltage fluctuation suppression strategy of bidirectional AC/DC converter in the islanding hybrid microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6225-6237.
- [5] Juan J Martínez-Nolasco, Sergio Cano-Andrade, José Alfredo Padilla-Medina, et al. Design and implementation of an embedded control system for the interconnection of a DC microgrid to the AC main network[J]. Electric Power Components and Systems, 2020, 48(5): 1-16.
- [6] Avirup Maulik, Debapriya Das. An accurate current sharing method for an islanded droop-controlled DC microgrid without communication between remote buses[J/OL]. International Transactions on Electrical Energy Systems: (2020-03-10) [2020-10-27]. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12473>.
- [7] Mohsen Rezaei Adaryani, Seyed Abbas Taher, Josep M Guerrero, et al. Model predictive control of direct-drive wave power generation system connected to DC microgrid through DC cable[J/OL]. International Transactions on Electrical Energy Systems: (2020-06-10) [2020-10-27]. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12484>.
- [8] Hassan Pourvali Souraki, Masoud Radmehr, Mohammad Re-

(下转第67页)

- Electronics, 2018, 52(7):103-105.
- [9] 马文飞, 吴孔平. 基于李雅普诺夫稳定性的微电网分析方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(12):27-31.
Ma Wenfei, Wu Kongping. Analysis method of micro-grid based on Lyapunov stability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(12):27-31.
- [10] 李刚, 冯振乾, 赵宝康, 等. 一种面向空地一体化组网的体系架构[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(9):1797-1802.
Li Gang, Feng Zhenqian, Zhao Baokang, et al. An architecture for integrated spatial-terrestrial networks[J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(9):1797-1802.
- [11] 陈静, 涂梦洁, 王一飞, 等. 大容量无功快速补偿方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6):1-6.
Chen Jing, Tu Mengjie, Wang Yifei, et al. Study on high capacity reactive power fast compensation method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):1-6.
- [12] 贾先平, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 含柔性负荷的主动配电网优化模型研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(13):46-52, 116.
Jia Xianping, Zou Xiaosong, Yuan Xufeng, et al. Study on optimal model of active distribution network with flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(13):46-52, 116.
- [13] 韩忠明, 毛锐, 郑晨烨, 等. 一种有效的动态网络节点影响力模型[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(7):1960-1964.
Han Zhongming, Mao Rui, Zheng Chenye, et al. Effective model for measuring node influence on temporal network[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(7):1960-1964.
- [14] 盖阔, 安群涛, 孙力. 基于多重比例谐振的动态电压恢复器谐波补偿策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1):156-161.
Gai Kuo, An Quntao, Sun Li. Harmonic compensation strategy of dynamic voltage restorer based on multiple proportional resonant[J]. Application Research of Computers, 2018, 38(1):156-161.
- [15] 徐小虎, 夏昌龙, 郭志伟, 等. 啁啾场调控的高次谐波空间分布及孤立阿秒脉冲产生[J]. 中国激光, 2018, 45(6):34-41.
Xu Xiaohu, Xia Changlong, Guo Zhiwei, et al. Spatial distribution of high-order harmonic controlled by chirped laser pulse and isolated attosecond pulse generation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(6):34-41.

收稿日期:2020-06-17

修改稿日期:2020-10-29

(上接第34页)

- zanejad. Lyapunov theory combined with small signal linearization for regulated operation of a hybrid DC/AC microgrid[J/OL]. International Transactions on Electrical Energy Systems: (2020-06-10) [2020-10-27]. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12497>.
- [9] Prashant Singh, Jagdeep Singh Lather. Variable structure control for dynamic power-sharing and Voltage regulation of DC microgrid with a hybrid energy storage system[J/OL]. International Transactions on Electrical Energy Systems: (2020-06-30)[2020-10-27]. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12510>.
- [10] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17):115-121.
Dong Jijun, Chen Hao, Zhou Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17):115-121.
- [11] Cucuzzella M, Trip S, De Persis C, et al. A robust consensus algorithm for current sharing and voltage regulation in DC micro-grids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(4):1583-1595.
- [12] Ni Hui, Xu Xiaolu, Hao Gong, et al. Design of fast fault diagnosis system for transformer equipment based on CBR and RBR[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 546(5):26-31.
- [13] Satish Gaurav, Vibhuti Nougain, Bijaya Ketan Panigrahi. Protection of low-voltage DC microgrid based on series R-L-C equivalent circuit utilizing local measurements[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(18):3877-3885.
- [14] Rajesh J Sevugan, Karthikeyan R, Revath R, et al. Hybrid DPSO based MPPT control of high static gain converter in photovoltaic system for DC microgrid applications[C]/IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.
- [15] 王民华, 李凤霞. 混合储能平抑微电网功率波动控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4):215-220.
Wang Minhua, Li Fengxia. Study on control strategy of hybrid energy storage used in stabilization power fluctuation of microgrid[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):215-220.

收稿日期:2020-10-27

修改稿日期:2020-11-16