

具有容性负载的直流微电网系统分布式协同控制

刘建刚^{1,2,3} 杨胜杰²

摘 要 针对一类具有容性负载的直流微电网系统, 提出了分布式协同控制方法. 具有容性负载的直流微电网是一类耦合动态互联非线性网络化系统, 可将 DC-DC 变换器在信息层视为智能体, 在每个子系统模块中, 引入容性负载电压观测器, 耦合并联非线性系统负载均衡控制设计问题可解耦成一阶积分器多智能体系统的输出一致性跟踪问题. 基于最近邻原则, 通过在控制器中引入比例、积分环节, 设计了增益可调的分布式协同 PI 控制律, 当有向图满足至少含有一棵生成树的条件下, 通过子系统间的局部交互, 可以实现负载均衡的目标. 通过分析增广系统矩阵的特征值证明了整个闭环系统的稳定性. 仿真和实验说明了所提出的控制方法的有效性及其可行性.

关键词 直流微电网系统, 容性负载, 分布式负载均衡, 协同控制

引用格式 刘建刚, 杨胜杰. 具有容性负载的直流微电网系统分布式协同控制. 自动化学报, 2020, 46(6): 1283–1290

DOI 10.16383/j.aas.c190018

Distributed Cooperative Control of DC Micro-Grid Systems With Capacitive Loads

LIU Jian-Gang^{1,2,3} YANG Sheng-Jie²

Abstract In this paper, a distributed cooperative control is proposed for DC micro-grid systems with capacitive loads that is the coupled dynamical interconnected nonlinear networked systems. By considering each DC-DC converter as an agent in the cyber layer and introducing voltage observers for capacitive loads in each sub-system, the coupled nonlinear dynamics is decoupled into a first-order integrator and the load-sharing control design is converted into an output consensus tracking problem of such linear multi-agent system. Based on the nearest neighborhood rule, a distributed cooperative PI control law with tunable gains is designed accordingly by adopting proportional and integral control loop. The load-sharing objective is achieved through local interaction in a cooperative way provided that the directed graph at least has a spanning tree. The overall closed-loop system stability is rigorously proved by analyzing the eigenvalues of the augmented system's matrix. Simulations and experimental results verify that the proposed approach is effective and feasible.

Key words DC micro-grid systems, capacitive loads, distributed load-sharing, cooperative control

Citation Liu Jian-Gang, Yang Sheng-Jie. Distributed cooperative control of DC micro-grid systems with capacitive loads. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(6): 1283–1290

微电网是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统, 是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 既可以与外部电网并网运行, 也

可以独立运行. 由于各种可再生能源(太阳能)、储能元件(电池、超级电容)、负载(电子元件、马达、LED 照明设备、充电机)等具有直流特性, 因此直流微电网相对于交流微电网在电动汽车、舰船、航天飞机、潜艇等领域得到越来越广泛的应用. 然而, 直流微电网系统本身面临着负载均衡问题.

近年来, 分布式协同控制方法得到了广泛关注, 其起源于分布式计算及 Jadbabaie 等对 Viseck 模型的理论解释^[1], 通过子系统之间的局部交互实现全局目标, 其中典型的方法包括一致性算法和 Gossip 算法, 其具有较强的扩展性和鲁棒性^[2-3]. 近 10 年来 Olfati-Saber 等^[4]、Ren 等^[5]、Qu 等^[6] 针对智能体彼此孤立的多智能体系统开展了一系列研究, 成功应用在智能交通系统中无人车辆的自动驾驶, 作战系统中无人机的编队飞行, 卫星系统中航天器与飞行器的姿态调整与同步、移动传感网络中的目标追踪等领域.

收稿日期 2019-01-08 录用日期 2019-09-24

Manuscript received January 8, 2019; accepted September 24, 2019

国家自然科学基金(11601145), 湖南省教育厅科研项目基金(18A309, 16B143), 湖南省自然科学基金(2018JJ3264)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (11601145), Research Project of the Education Department of Hunan Province (18A309, 16B143), and Natural Science Foundation of Hunan Province (2018JJ3264)

本文责任编辑 张俊

Recommended by Associate Editor ZHANG Jun

1. 湖南工商大学数学与统计学院 长沙 410205 2. 湖南工商大学大数据与互联网创新研究院 长沙 410205 3. 统计学习与智能计算湖南省重点实验室 长沙 410205

1. School of Mathematics and Statistics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205 2. Institute of Big Data and Internet Innovation, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205 3. Key Laboratory of Hunan Province for Statistical Learning and Intelligent Computation, Changsha 410205

分布式协同控制理论 近年来又应用在微电网系统等领域,并取得了一定的成果^[7-10]. 针对模块化 DC-DC 变换器并联构成的系统,美国德州大学阿灵顿分校 Lewis 教授和 Davoudi 教授共同领导的团队采用分布式协同控制的方法,实现了 DC-DC 变换器的输出电流均衡,同时也实现了电压跟踪调节的目标^[8]. 所提出的控制方法不需要集中式的控制器,单个节点的故障,不会影响整个系统的性能,具有较高的可靠性^[9]. 同时,该方案适用于有向及无向通信拓扑,可以实现即插即用的功能,并且对于节点故障、通信链路故障具有鲁棒性.

针对直流微电网, Lewis 团队将每个 DC-DC 变换器视为智能体,提出了分布式协作主从控制方法,解决了直流微电网中的比例负载均衡问题. 其中每个 DC-DC 变换器不仅具有各自的局部负载,而且具有公共的远程负载,其中的负载是阻性负载,控制过程中引入电流环与电压环,不仅要对电流进行均衡,而且还要对电压进行调节,通过每个 DC-DC 变换器之间的局部信息交互,最终实现负载均衡^[10].

丹麦奥尔堡大学的 Guerrero 团队针对直流微电网群,建立了小信号模型,分析了系统参数、常值功率负载、线路阻抗对系统稳定性的影响,同时提出了分层控制框架^[11]. 美国德州大学阿灵顿分校 Davoudi 教授领导的团队针对直流微电网群,将每个微电网视为智能体,基于协同控制的原理,利用分布式控制方法,在第三层实现了微电网之间的负载均衡^[12]. 文献 [13] 将直流微电网电压调节和负载均衡控制设计刻画成一个多目标优化问题,提出了

分布式协同控制方法,并且其能够处理通信时延问题. 文献 [14] 针对直流微电网提出了柔性协同控制策略,来抵抗信息攻击带来的负面效应.

目前,所开展的研究多针对由模块化 DC-DC 变换器并联构成的直流微电网系统,负载为阻性负载,建模后为线性系统^[9-10]. 当电网中具有容性负载时,建模后的系统为非线性耦合系统,本文拟针对此类容性负载直流微电网系统,解决其负载均衡问题.

本文拟通过引入容性负载电压观测器,将直流微电网系统的负载均衡控制问题转化为一阶积分器多智能体系统的一致性跟踪问题,基于最近邻原则,在有向通信拓扑之上,设计了分布式协作负载均衡控制器,通过分析增广矩阵的特征值,来证明整个闭环系统的稳定性.

本文组织如下:第 1 节主要针对一类具有容性负载的直流微电网系统,对其进行了建模,并对其负载均衡问题进行阐述,在第 2 节通过引入容性负载电压观测器,将并联系统进行解耦,设计具有比例、积分环节的分布式协同控制器,并借助增广矩阵对闭环系统进行稳定性分析,第 3 节在直流微电网电流均衡控制实例中,对结果进行分析,第 4 节对全文进行了总结.

1 问题描述

考虑一类具有超级电容负载,由 DC-DC 变换器并联构成的直流微电网系统,如图 1 所示,借助状态空间平均法建模如下^[15-16]

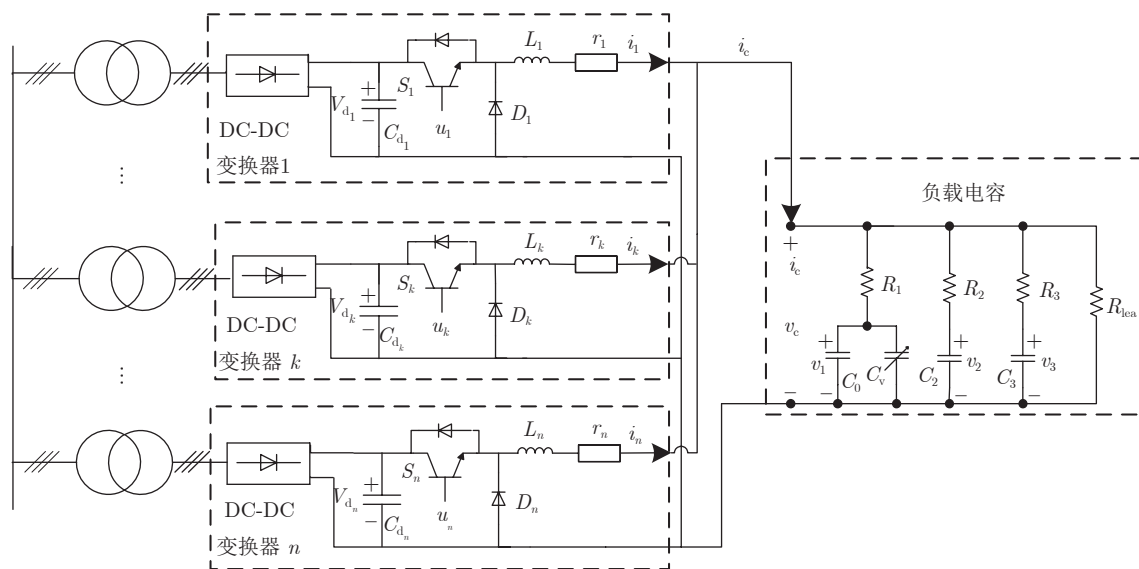


图 1 具有容性负载的直流微电网系统

Fig.1 The DC micro-grid systems with capacitive loads

$$\begin{cases} L_k \frac{di_k}{dt} = V_{dk} u_k - i_k r_k - v_c \\ (C_0 + C_v v_c) \frac{dv_c}{dt} = \sum_{m=1}^n i_m \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\begin{bmatrix} i_k \\ v_c \end{bmatrix}$ 是每个子系统的状态 x_k , 包含了每个支路的输出电流 i_k 和负载电压 v_c , $u_k(t)$ 为占空比输入. 每个子系统的输出为

$$y_k = i_k \quad (2)$$

从式 (1) 中可看出, 子系统之间具有公共的耦合变量 v_c , 每个子系统的状态 x_k 依赖于其他子系统的状态, 子系统之间是彼此耦合的, 因此, 系统 (1) 区别于传统的子系统彼此孤立的多智能体系统.

需要设计控制器实现如下负载均衡目标

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |y_k(t) - y_0| = 0 \quad (3)$$

其中, y_0 为参考目标. 式 (3) 意味着随着时间的推移, 每个子系统的输出最终要跟踪上参考目标.

注 1. 参考电流 y_0 计算式为

$$y_0 = \frac{i_c}{n} = \frac{1}{n} \frac{C_{sc}(0)(v_c(t_d) - v_c(0))}{t_d}$$

其中, $v_c(t_d)$ 为在要求的充电时间 t_d 内的期望达到的电压, $C_{sc}(0)$ 为负载电容的初始电容值, $v_c(0)$ 为负载电容的初始剩余电压, $v_c(t_d)$, $C_{sc}(0)$, $v_c(0)$ 这些参数依赖于直流微电网系统的物理设计, 可以预先获得. i_c 为总的充电电流, 可以依据这些物理参数利用此公式预先计算出来. n 为参与充电的并联 DC-DC 变换器的数目, 其可以通过通信获得.

电流参考目标 y_0 被预先配置在其中一个变换器模块中, 每个变换器模块借助工业总线交换电流状态信息, 通过各子系统之间的局部交互, 设计分布式协同控制器可以解决直流微电网系统负载均衡问题.

注 2. 超级电容储能系统已经广泛应用于电动汽车、储能式轻轨、风光发电储能、电力系统中电能质量调节、脉冲电源等, 是典型的具有较大容性负载的直流微电网系统. 其中, 储能式轻轨作为一种新型电力牵引轨道交通系统, 采用超级电容作为动力源. 利用超级电容这种高效率的储能设备, 不需要架设牵引电网, 再生制动的能量可以被吸收并重新利用. 当储能式轻轨停靠站台时, 超级电容需要在有限的时间内被充满. 因此, 充电系统需要提供足够大的输出功率来缩短充电时间. 一种有效的方式是将充电机进行并联以提高系统的容量, 然而, 由于每个充电系统不可避免地存在着组件误差和工

艺误差, 如何平衡每个充电机的输出电流, 便成为一个挑战.

2 分布式协同控制

本节首先介绍图论基础, 将直流微电网系统的通信拓扑利用图来刻画; 其次, 将并联 DC-DC 变换器视为智能体, 将直流微电网系统的负载均衡控制问题转化为一阶积分器多智能体系统的输出一致性跟踪问题; 再次, 基于最近邻原则, 设计了分布式协作负载均衡控制律, 并证明了闭环系统的稳定性.

2.1 图论基础

在本文中 n 个模块之间的通信拓扑利用图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 来描述^[17], $\nu = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 是节点集, ε 是边集 $\varepsilon \subseteq \nu \times \nu$, $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ 是非负邻接矩阵, 其元素 a_{ij} 为非负数.

当通信拓扑是固定的, 邻接矩阵 A 是常值矩阵. 从节点 j 到节点 i 的边记作 (v_j, v_i) , 意味着节点 i 可以接收到节点 j 的信息. a_{ij} 为边 (v_j, v_i) 的权值. 若 $(v_j, v_i) \in \varepsilon$, 则 $a_{ij} > 0$. 本文中假定图没有自环, 即 $a_{ii} = 0$. 若 $(v_j, v_i) \in \varepsilon$, 则节点 j 称为节点 i 的邻居. 节点 i 的邻居集表示成 $N_i = \{v_j \in \nu : (v_j, v_i) \in \varepsilon\}$.

定义 1. 如果图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 没有自环, 则其是简单图^[17], 即其邻接矩阵对角线元素 $a_{ii} = 0$ 且其拉普拉斯矩阵为 $L = [l_{ij}]_{n \times n}$

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik}, & j = i \\ -a_{ij}, & j \neq i \end{cases} \quad (4)$$

入度矩阵定义为 $D = \text{diag}\{d_i\} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 其具有元素 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$. 拉普拉斯矩阵也可以定义为 $L = D - A$.

注 3. 由定义 1 可以看出, 拉普拉斯矩阵 L 每一行, 行和为 0, 即 $L \cdot \mathbf{I}_n = 0 \cdot \mathbf{I}_n$. 意味着 L 有一个特征值为 0, 即 L 是奇异矩阵.

节点 j 到节点 i 的有向路可表示成边的序列

$$\{(v_i, v_k), (v_k, v_l), \dots, (v_m, v_j)\}$$

若在图中从根节点到其他任意节点都存在一条有向路, 则称图具有一棵生成树.

2.2 协同控制器设计及系统分析

直流微电网系统本质上是信息物理融合系统 (Cyber-physical systems, CPS), 在信息层将变换器模块视为智能体, 可以基于多智能体协同控制的思想来设计负载均衡控制器.

鉴于 DC-DC 变换器之间借助控制器局域网

络 (Control area network, CAN) 总线进行通信^[18], 直流微电网系统通信网络可以建模成有向图 $G(\nu, \varepsilon, A)$.

假设 1. 有向图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 至少含有一棵生成树, 且位于根节点的变换器知道参考电流 y_0 的信息.

为了便于控制器的设计, 定义局部电流跟踪误差为

$$e_k = \sum_{m \in N_k} a_{km}(y_m - y_k) + g_k(y_0 - y_k) \quad (5)$$

其中, $N_k = \{v_m \in \nu : (v_m, v_k) \in \varepsilon\}$ 为节点 v_k 的邻居集, a_{km} 为有向图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 对应的邻接矩阵 A 中的元素, 其刻画了节点 m 到节点 k 的通信权重. $a_{km} > 0$ 意味着第 k 个变换器模块可以收到第 m 个变换器模块的信息. g_k 是牵制增益, 根据假设 1 可得 $g_k > 0$, 表示至少有一个变换器模块知道参考电流 y_0 的信息.

借助拉普拉斯矩阵 L , 可得全局电流跟踪误差向量 $\mathbf{e}$, 为

$$\mathbf{e} = -(L + G)(\mathbf{Y} - Y_0) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{Y} = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_n]^T$ 为全局电流向量, $\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_n]^T$, $Y_0 = \mathbf{I}_n \cdot y_0$, $G = \text{diag}\{g_k\} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为牵制增益矩阵, 其是一个对角矩阵.

在每个子系统模块中, 引入容性负载电压观测器, 设计如下

$$\hat{v}_{c_k}(t) = v_{c_k}(t) + \int_0^t \sum_{m \in N_k} a_{km}(\hat{v}_{c_m}(\tau) - \hat{v}_{c_k}(\tau))d\tau \quad (7)$$

观测器 k 可以接收邻居的估计 $\hat{v}_{c_m}$ ($m \in N_k$), 于是其可以通过与邻居估计值比较并结合局部电压测量值 v_{c_k} 来更新自己的估计值 $\hat{v}_{c_k}$.

式 (7) 中的更新原则, 称作动态一致性协议^[10], 每个模块的电压测量直接应用于更新协议中, 于是任何测量电压 v_{c_k} 的变化都会影响估计值 $\hat{v}_{c_k}$, 借助连通的通信网络, $\hat{v}_{c_k}$ 的任何改变都会传播到其他与之有通信的节点, 最终, 所有观测器节点的估计值趋于一致, 并且逼近负载电容的电压真实值, 可得:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \hat{v}_{c_k}(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_{c_k}(t) \quad (8)$$

于是, 直流微电网系统 (1) 可以线性化并解耦成由 n 个一阶积分器构成的多智能体系统^[19], 如下:

$$\dot{y}_k = \frac{V_{d_k} u_k - y_k r_k - v_c}{L_k} = v_k \quad (9)$$

即, 将并联 DC-DC 变换器模块视为智能体, 直流微电网系统的负载均衡问题可以转化为一阶多智

能体系统的一致性跟踪问题.

注 4. 设计观测器的作用在于估计负载电容的电压, 通过观测器节点的局部交互使得各节点的估计值逼近负载电压的真实值. 可以使耦合量 v_c 变成已知量, 从而式 (1) 可解耦为式 (9), 式 (9) 与前述的观测器设计关系在于借助观测器来得到式 (9) 中一致的电压值 v_c .

基于最近邻原则以及子系统自身负反馈、子系统之间正反馈这一协同控制器设计原则, 结合局部电流跟踪误差, 设计虚拟控制输入, 如下

$$v_k = k_p e_k + k_i \int_0^t e_k dt \quad (10)$$

其中, k_p , k_i 为待设计的比例、积分控制增益.

进一步, 可得分布式协作负载均衡控制器, 如下

$$u_k = \frac{L_k}{V_{d_k}} v_k + \frac{y_k r_k}{V_{d_k}} + \frac{v_c}{V_{d_k}} \quad (11)$$

在所设计的分布式协作负载均衡控制方案中, 只有一个位于根节点的变换器模块知道参考电流 y_0 (虚拟 Leader) 的信息, 其他变换器模块只需要知道自己及邻居节点的信息. 通过比较输出电流 y_k 以及所有的邻居节点电流 y_m , 可以计算出局部电流跟踪误差 e_k , 此误差经过比例、积分控制环节, 可得虚拟控制输入 v_k , 借助反馈机制, 可得最终的控制输入 u_k . 借助模块之间的局部信息交互, 负载均衡控制目标最终可以实现. 区别于文献 [8, 10] 要求拓扑图双向连通且要保证拉普拉斯矩阵是平衡矩阵, 本文所提出的负载均衡控制方案是在假设有向图中至少含有一棵生成树的条件下提出的.

定理 1. 考虑直流微电网系统 (1), 在假设 1 下有向图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 至少含有一棵生成树且至少存在一个位于树根位置的节点有 $g_k > 0$, 在所设计的分布式协作负载均衡控制律 (11) 中, 若控制增益 k_p, k_i 满足

$$\begin{bmatrix} 0_{n \times n} & \mathbf{I}_n \\ -k_i(L + G) & -k_p(L + G) \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

则直流微电网系统负载均衡目标即可实现, 即每个并联 DC-DC 变换器模块可以跟踪期望的参考电流 y_0 . 进一步可得, 整个闭环系统是稳定的.

证明. 令 $\varepsilon_k = y_k - y_0$, $\dot{z}_k = \varepsilon_k$, 则借助拉普拉斯矩阵 L 和牵制增益矩阵 G 可得闭环系统, 为

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0_{n \times n} & \mathbf{I}_n \\ -k_i(L + G) & -k_p(L + G) \end{bmatrix}}_{A_c} \begin{bmatrix} z \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $z = [z_2 \ \cdots \ z_n]^T$, $\varepsilon = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \cdots \ \varepsilon_n]^T$.

系统矩阵 A_c 的特征方程为

$$\begin{vmatrix} s\mathbf{I}_n & -\mathbf{I}_n \\ k_i(L+G) & s\mathbf{I}_n + k_p(L+G) \end{vmatrix} = 0 \quad (14)$$

进一步, 可得:

$$\begin{aligned} |s\mathbf{I}_n(s\mathbf{I}_n + k_p(L+G)) + k_i(L+G)| = \\ |s^2\mathbf{I}_n + (k_p s + k_i)(L+G)| = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

A_c 的特征方程可以重写为

$$\det((k_p s + k_i)(L+G) + s^2\mathbf{I}_n) = 0 \quad (16)$$

已知矩阵 $L+G$ 的特征方程为 $\det((L+G) - \kappa\mathbf{I}_n) = 0$ 并且有特征根 $\kappa = \lambda_i > 0$ [20].

于是, 可得方程

$$s^2 + k_p\lambda_i s + k_i\lambda_i = 0 \quad (17)$$

由于 $\lambda_i > 0, k_p > 0, k_i > 0$, 则方程 (17) 有解 $s \in C^-$. 当满足条件

$$\begin{bmatrix} 0_{n \times n} & \mathbf{I}_n \\ -k_i(L+G) & -k_p(L+G) \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

时, 控制增益 k_p, k_i 便可以确定, 因此整个闭环系统是稳定的, 负载均衡目标可以实现. $\square$

注 5. 在控制律 (11) 中, 对于每个变换器模块可以选取不同的控制增益 k_p, k_i , 将证明过程中的参数 k_p, k_i 改为对角矩阵, 则定理中的不等式条件 (12) 便变为

$$\begin{bmatrix} 0_{n \times n} & \mathbf{I}_n \\ -K_i(L+G) & -K_p(L+G) \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

其中对角矩阵

$$\begin{aligned} K_i &= \text{diag}\{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}\} \\ K_p &= \text{diag}\{k_{p1}, k_{p2}, \dots, k_{pn}\} \end{aligned}$$

选择不同的控制增益可以更好地匹配并联 DC-DC 变换器模块的非等同特性, 也更能体现出负载均衡控制律的完全分布式.

注 6. 本文提出的分布式协同控制方法中引入容性负载电压观测器, 将耦合并联非线性系统负载均衡控制设计问题转化成一阶积分器多智能体系统的输出一致性跟踪问题, 实现了非线性耦合动态互联系统的解耦, 在控制方案中引入比例、积分环节, 设计了增益可调的分布式协同 PI 控制律. 同时, 本文假定有向通信拓扑只含有一棵生成树, 其对应的拉普拉斯矩阵特征结构更复杂, 使得系统分布式协同控制设计及闭环系统稳定性分析增加了一定难度.

3 实例应用

3.1 仿真

首先考虑具有容性负载的由 3 个 DC-DC 变

器并联构成的直流微电网系统, 相关参数如下:

$$\begin{aligned} V_{d1} &= 23.8 \text{ V}, & V_{d2} &= 24.3 \text{ V}, & V_{d3} &= 23.5 \text{ V} \\ L_1 &= 98 \text{ } \mu\text{H}, & L_2 &= 100 \text{ } \mu\text{H}, & L_3 &= 99 \text{ } \mu\text{H} \\ r_1 &= 3.0 \text{ m}\Omega, & r_2 &= 2.8 \text{ m}\Omega, & r_3 &= 3.3 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

负载电容的物理参数为 $C_0 = 2\ 200 \text{ } \mu\text{F}$, $C_v = 0.0747 \text{ F/V}$.

3 个模块之间采用 CAN 总线通信协议, 其通信拓扑可以建模成如图 2 所示的有向图, 从图中可以看出 3 个模块之间的通信是单向的, 只有编号为 1 的模块可以直接获取参考电流的信息, 很显然图中具有一棵有向生成树.

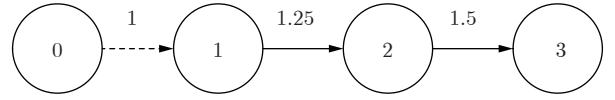


图 2 3 个模块之间的通信拓扑
Fig. 2 The communication topology for the three modules

通信权重 a_{ij} 及牵制增益 g_i 的选取如图 2 所示, 从图中可知只有 $g_1 = 1$, 每个变换器模块的初始电流为 0A, 参考目标 $y_0 = 1\text{A}$, 控制增益 $k_p = 0.05$, $k_i = 0.05$.

从图 3 可以看出, 采用所提出的分布式协同控制策略, 3 个模块通过彼此之间的局部交互, 均收敛到参考电流目标 1 A. 当 3 个模块之间的通信时断时续时, 如图 4 所示, 尽管也实现了电流均衡的目标, 但是与图 3 相比, 收敛时间明显变长.

接下来考虑由 10 个模块 DC-DC 变换器构成的直流微电网系统, 模块之间采用有向路图, 对于有连接的边, 通信权重 $a_{ij} = (i \times j)/10$, 只有编号

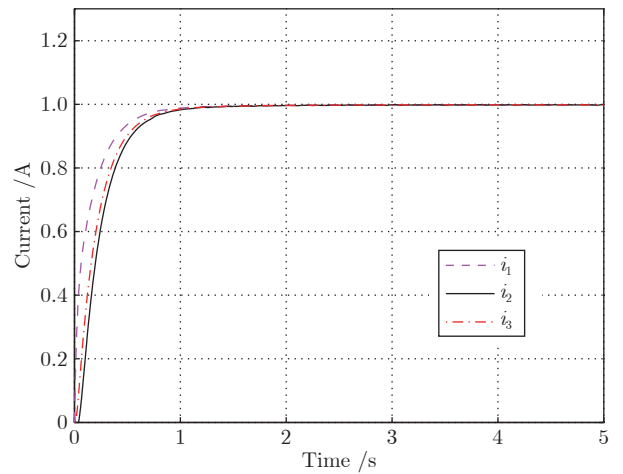


图 3 3 个模块的输出电流均衡曲线
Fig. 3 The current-sharing curves for the three modules

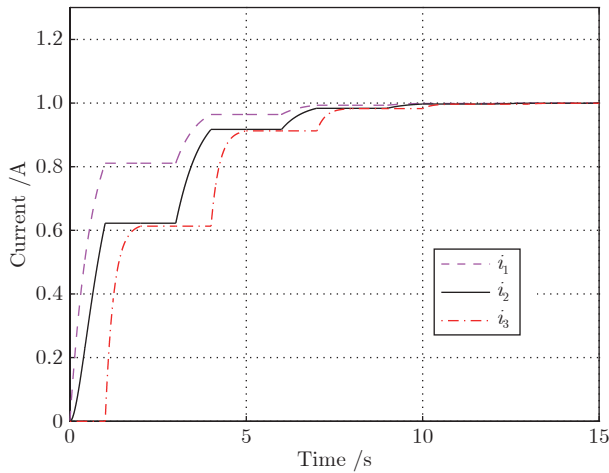


图 4 通信时断时续下 3 个模块的输出电流均衡曲线

Fig.4 The current-sharing curves for the three modules with time varying communication

为 1 的模块知道参考电流的信息, 仍然选取控制增益 $k_p = 0.05$, $k_i = 0.05$, 从图 5 可以看出, 输出电流均衡目标可以实现. 在此基础上, 调节控制增益, 即选择控制增益 $k_p = 0.05$, $k_i = 0.2$, 从图 6 可以看出, 当调大积分增益的情况下, 尽管实现了电流均衡目标, 但是出现了明显的超调现象.

进一步将变换器模块的数量增加至 30 个, 模块之间仍然采用有向路图, 对于有连接的边, 通信权重定义为 $a_{ij} = (i \times j)/30$, 牵制增益 $g_1 = 1$, 控制增益 $k_p = 0.05$, $k_i = 0.05$, 从图 7 可以看出, 在存在一定的稳态误差的情况下, 大部分模块输出电流均衡到了参考目标 1 A.

3.2 实验

采用如图 8 所示的均流实验平台来验证所提出

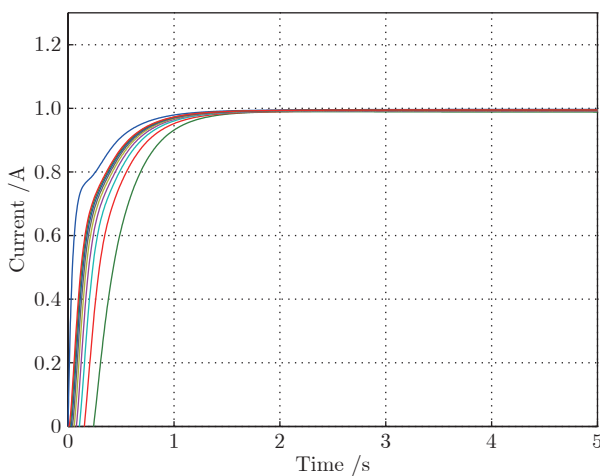


图 5 10 个模块的输出电流均衡曲线

Fig.5 The current-sharing curves for the ten modules

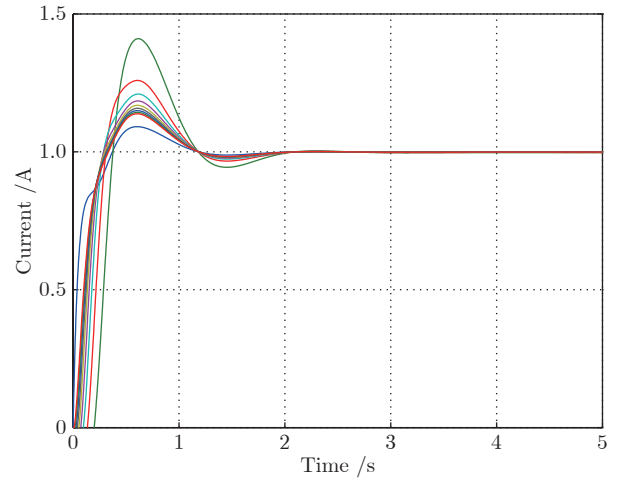


图 6 调节增益下 10 个模块的输出电流均衡曲线

Fig.6 The current-sharing curves for the ten modules when the gains are tuned

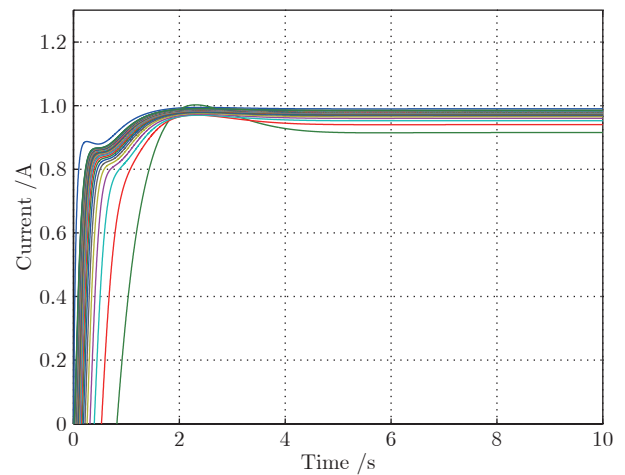


图 7 30 个模块的输出电流均衡曲线

Fig.7 The current-sharing curves for the 30 modules

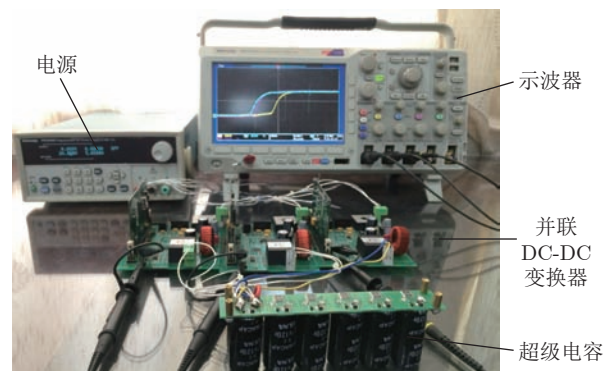


图 8 均流实验平台

Fig.8 Hardware setup

的分布式协同控制方法, 实验场景中包含 3 个并联的 DC-DC 变换器, 负载为超级电容, 电源提供输入 24 V 电压, 数字信号处理器 (Digital signal processor, DSP) 选用 TMS320F2808, 控制周期 $25\ \mu\text{s}$, 16 路 12 位内部 AD 转换, 16 路脉宽调制 (Pulse width modulation, PWM) 输出频率为 40 kHz. 从图中实验结果可以看出, 在选取不同控制增益的情况下, 采用本文的控制方法均实现了输出电流均衡目标. 其中图 9 中控制增益 $k_p = 0.05$, $k_i = 0.05$, 图 10 中控制增益 $k_p = 0.05$, $k_i = 0.2$, 从两种实验结果对比来看, 当积分控制增益变化时, 在图 10 中出现了超调现象.

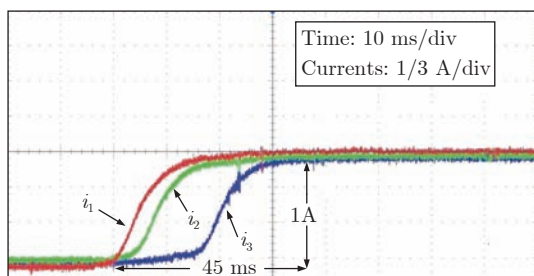


图 9 并联模块均流实验结果

Fig.9 The current-sharing experimental results for 3 parallel-connected modules

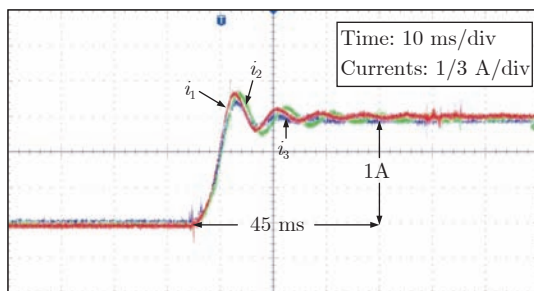


图 10 增益调节下并联模块均流实验结果

Fig.10 The current-sharing experimental results for 3 parallel-connected modules when the gains are tuned

4 结论

本文探讨了一类具有容性负载的直流微电网系统的负载均衡控制问题, 通过借助容性负载电压观测器对电压估计, 实现了并联系统解耦, 基于最近邻原则, 在控制器中引入比例、积分环节, 设计了分布式协同 PI 控制律, 通过分析增广矩阵的特征值分布, 证明整个闭环系统是稳定的. 本文所提出的控制方法可以独立控制每个 DC-DC 变换器模块, 当每个模块获取自身以及相邻模块的状态信息, 即当有向图至少含有一棵生成树时, 利用本文所提的

控制方法完成变换器模块间的局部信息交互, 达到了均衡负载的目的. 通过调节比例、积分控制增益, 可以改善系统的收敛性能. 仿真和实验结果表明, 所提出的控制方法是有效的和可行的.

References

- 1 Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile agents using nearest neighbor rules. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, **48**(6): 988–1001
- 2 Olfati-Saber R, Alex Faxand J, Murray R. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems. *Proceedings of the IEEE*, 2007, **95**(1): 215–233
- 3 Aysal T C, Yildiz M E, Sarwate A D, Scaglione A. Broadcast gossip algorithms for consensus. *IEEE Transaction on Signal Process*, 2009, **57**(7): 2748–2761
- 4 Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(9): 1520–1533
- 5 Ren W, Beard R W. Consensus seeking in multi-agent systems under dynamically changing interaction topologies. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(5): 655–661
- 6 Qu Z H, Wang J, Hull R A. Cooperative control of dynamical systems with application to autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, **53**(4): 894–911
- 7 Xin H H, Lu Z, Qu Z H, Gan D F, Qi D. Cooperative control strategy for multiple photovoltaic generators in distribution networks. *IET Control Theory and Applications*, 2011, **5**(14): 1617–1629
- 8 Moayedi S, Nasirian V, Lewis F L, Davoudi A. Team oriented load sharing in parallel DC-DC converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **51**(1): 479–490
- 9 Behjati H, Davoudi A, Lewis F L. Modular DC-DC converters on graphs: Cooperative control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, **29**(12): 6725–6741
- 10 Nasirian V, Davoudi A, Lewis F L, Guerrero J. M. Distributed adaptive droop control for DC distribution systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, **29**(4): 944–956
- 11 Shafiee Q, Dragicevic T, Vasquez J C, Guerrero J. M. Hierarchical control for multiple DC-microgrids clusters. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2014, **29**(4): 922–933
- 12 Moayedi S, Davoudi A. Distributed tertiary control of DC microgrid clusters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(2): 1717–1733
- 13 Ding L, Han Q L, Wang L Y, Sindi E. Distributed cooperative optimal control of DC microgrids with communication delays.

- IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, **14**(9): 3924–3935
- 14 Abhinav S, Modares H, Davoudi A, Lewis F L. Resilient cooperative control of DC microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, **10**(1): 1083–1086
 - 15 Erickson R W. *Fundamentals of Power Electronics*. London: Kluwer Academic Publishers, 2004. 1–883
 - 16 Zubieta L, Bonert R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, **36**(1): 199–205
 - 17 Diestel R. *Graph Theory*. New York: Springer-Verlag, 1997. 1–451
 - 18 Bassi E, Benzi F, Lusetti L, Buja G S. Communication protocols for electrical drives. In: Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. Orlando, USA: IEEE, 1995. 706–711
 - 19 Behjati H, Davoudi A, Lewis F L. Distributed multiagent control of parallel Cúk converters using feedback linearization. In: Proceedings of the 29th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fort Worth, USA: IEEE, 2014. 1979–1985
 - 20 Zhang H W, Lewis F L, Qu Z H. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, **59**(7): 3026–3041



刘建刚 湖南工商大学数学与统计学院特聘副教授. 2015 年获得中南大学交通信息工程及控制专业博士学位. 主要研究方向为多智能体系统及微电网分布式协同控制, 并联充电系统均流控制.

E-mail: jgangliu@csu.edu.cn

(LIU Jian-Gang Associate professor at the School of Mathematics and Statistics, Hunan University of Technology and Business. He received his Ph.D. degree in transportation information engineering and control from Central South University in 2015. His research interest covers distributed cooperative control of multi-agent systems and micro-grids, and current-sharing of parallel charging systems.)



杨胜杰 湖南工商大学大数据与互联网创新研究院讲师. 2014 年获得湖南大学电气工程专业博士学位. 主要研究方向为智慧能源系统. 本文通信作者. E-mail: denan2003@163.com

(YANG Sheng-Jie Lecturer at the Institute of Big Data and Internet

Innovation, Hunan University of Technology and Business. He received his Ph.D. degree in electrical engineering from Hunan University in 2014. His main research interest is smart energy system. Corresponding author of this paper.)