

超级电容负载的耦合并联充电系统无源分布式协同控制

刘建刚^{1,2†}, 杨胜杰²

(1. 湖南工商大学 理学院, 湖南 长沙 410205; 2. 统计学习与智能计算湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410205)

摘要: 储能式轻轨车辆采用超级电容作为动力源, 其并联充电系统每个充电机不可避免的存在着线路不对称、元器件老化及工艺误差等因素, 使得输出电流不均衡. 本文将并联充电系统的电流均衡问题抽象成一类非线性耦合动态互联系统的输出同步问题, 结合系统的无源性, 根据最近邻原则, 借助饱和函数, 设计了保证控制输入有界的输出同步控制器. 利用子系统存储函数构造李雅谱诺夫函数, 在系统满足无源性、通信拓扑满足细致平衡条件的情况下, 借助Barbalat等相关引理证明了整个闭环系统的稳定性. 将提出的无源性协同控制方法运用到了具有超级电容负载的并联充电系统控制实例中, 借助仿真验证了本文提出的无源性协同控制方法的有效性.

关键词: 耦合动态互联系统; 均流; 分布式; 协同控制; 无源; 存储函数

引用格式: 刘建刚, 杨胜杰. 超级电容负载的耦合并联充电系统无源分布式协同控制. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 815 – 822

DOI: 10.7641/CTA.2021.00332

Passivity-based distributed cooperative control for coupled parallel charging systems with super-capacitor loads

LIU Jian-gang^{1,2†}, YANG Sheng-jie²

(1. School of Science, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China;

2. Key Laboratory of Hunan Province for Statistical Learning and Intelligent Computation, Changsha Hunan 410205, China)

Abstract: Because there exist manufacture errors inevitably and the line connection of the circuit can not be guaranteed to be completely symmetrical, the output currents of the parallel charging system for energy storage type light rail vehicles with super-capacitors as its power-supply are not balanced. In this paper, the current-sharing problem of parallel charging systems is abstracted into the output synchronization problem of one class nonlinear coupled inter-connected dynamical systems. The out synchronization controller is designed based on the nearest neighborhood rule by adopting a saturation function, considering the passivity for such systems. The closed-loop system stability is rigorously proved with the aid of Lyapunov function based on storage functions of sub-systems integrating with Barbalat lemmas, which is assumed that the system passivity condition and the communication topology details balanced condition are both satisfied. The passivity-based distributed cooperative control is applied in the parallel charging systems with super-capacitor loads. The effectiveness and applicability of the proposed methods is verified by simulations.

Key words: coupled inter-connected dynamical systems; current-sharing; distributed; cooperative control; passivity; storage function

Citation: LIU Jiangang, YANG Shengjie. Passivity-based distributed cooperative control for coupled parallel charging systems with super-capacitor loads. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 815 – 822

1 引言

储能式轻轨车辆是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. 当储能式轻轨车辆停靠站台时, 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的存在着组件误差和建模误差, 如何平衡每个充电机的输出电流, 便成为一个挑战^[1].

如果每个充电机的输出电流不平衡, 具有更大输

收稿日期: 2020–06–09; 录用日期: 2021–01–04.

†通信作者. E-mail: denan2003@163.com; Tel.: +86 15802501763.

本文责任编辑: 岳东.

国家自然科学基金项目(11601145), 湖南省教育厅科研项目(18A309, 19C1037, 20C0520)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of China (11601145) and the Scientific Research Project of Hunan Education Department (18A309, 19C1037, 20C0520).

出电流的充电机将会承担更大的输出功率,从而会产生更大的热应力,降低整个充电系统的可靠性和性能.因此,有必要来设计有效的均流控制策略来平衡每个充电机的输出电流^[2-3].

然而,在直流微电网中,并联DC-DC变换器的负载是公共的阻性负载,系统模型是线性系统^[4].作为微电网的工程应用,储能式轻轨并联充电系统中,超级电容作为充电对象,其是一个公共的容性负载.结合充电机Buck电路的工作原理及超级电容电压的动态特性,使得充电系统具有非线性特征,同时几台充电机在物理上并联在一起,具有强耦合特征,对于每个充电机而言,不可避免的存在着组件误差和工艺误差,于是可知该并联充电系统是一类非线性耦合动态互联系统.由于储能式轻轨每次停靠站台时,超级电容所剩余的电荷量未知且不尽相同,这就使得每次在有限时间内保证超级电容充满的参考电流不尽相同,要避免充电机之间产生环流,需要设计控制器保证并联充电机输出电流同步.

由于非线性耦合动态互联系统中每个系统模型的自由度、动态特性不尽相同,已有的基于同构的方法难以适用.基于无源性的协同控制方法,只关心系统的输入输出关系,将李雅谱诺夫函数的选取转化为能量存储函数的寻找,设计的控制器不受系统模型和阶

数的约束,容易实现分层化控制律设计,能够实现耦合动态互联系统中存在的不确定性和扰动与控制器设计的解耦^[5].在每次充电时参考电流不尽相同的情况下,基于无源性的分析方法能够解决并联充电系统这一类非线性耦合动态互联系统的输出同步问题,本文以此为出发点开展相关工作.

文章组织如下:第2节主要对并联充电系统建模及输出电流均衡问题进行阐述;在第3节设计分布式协同控制器,基于子系统存储函数构造李雅谱诺夫函数,在系统满足无源性、通信拓扑满足细致平衡条件下,借助Barbalat等相关引理,对闭环系统进行稳定性分析;第4节将本文的无源分布式协同控制方法运用到了具有超级电容负载的并联充电系统控制实例中,并对结果进行了分析;第5节对全文进行了总结.

2 问题描述

2.1 并联充电系统建模

如图1所示,储能式轻轨并联充电系统由10 kV交流供电网、10 kV/900 V变压器以及几个充电机并联子系统构成,每个充电机子系统借助CAN总线通信网络来交换状态信息^[6].

充电机子系统主要由三相桥式整流电路和DC-DC Buck电路构成,如图2所示.

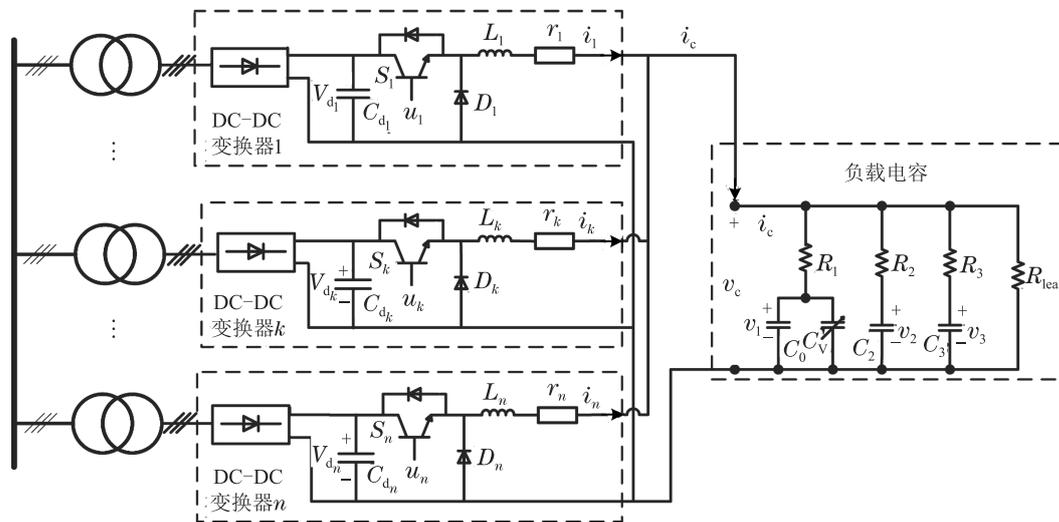


图1 并联充电系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram for parallel charging systems

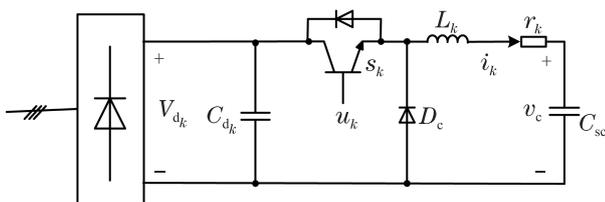


图2 充电机子系统对应的Buck电路图

Fig. 2 The Buck circuit for charging sub-systems

当图2中 S_k 开关绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)闭合时,DC-DC Buck电路中的电流动态特性描述为如下微分方程:

$$L_k \frac{di_k}{dt} = V_{d_k} - i_k r_k - v_c, \quad (1)$$

其中: i_k 为第 k 个充电机的输出电流, v_c 为超级电容的端电压, V_{d_k} 为三相桥式整流电路获得的DC输入

电压, r_k 为电路的等效内阻, L_k 为滤波电感的磁通量.

当开关IGBT关断时, DC-DC Buck电路中的电流动态特性描述为如下微分方程:

$$L_k \frac{di_k}{dt} = -i_k r_k - v_c. \quad (2)$$

超级电容为储能式轻轨充电系统的充电对象, 其特性很大程度上影响着控制的性能. 其特性可以简述如下: 超级电容的电容量 C_{sc} 会随着电压的升高而增大; 在充电过程的结束阶段, 电荷具有重分布的过程; 此外, 还存在着漏感电流. 鉴于上述特征, 超级电容可以用三支等效电路来描述^[7], 如图3所示.

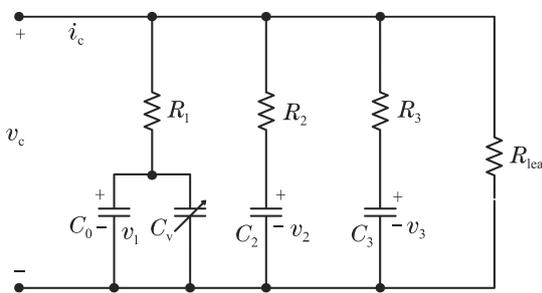


图3 超级电容三支等效电路示意图

Fig. 3 The three-branch equivalent circuit for super-capacitors

第1分支称作瞬时分支, 包括电阻器 R_1 、电容 C_0 、可变电容 C_v , 可变电容依赖于端电压; 第2分支称作延时分支, 包括电阻器 R_2 、电容 C_2 , 第3分支称作长期分支, 包括电阻器 R_3 、电容 C_3 ; 此外, 还存在漏感电阻 R_{lea} ; 这3个分支的时间常数是不同的, 分别为秒级、分钟级、十分钟级; 由于储能式轻轨需要在靠站点几十秒内快速的为超级电容充满电, 因此, 整个充电过程主要依赖于第1分支.

于是, 超级电容电容量与端电压之间的关系可以描述如下:

$$C_{sc} = C_0 + C_v v_c, \quad (3)$$

进而, 超级电容电压动态特性可以描述为以下非线性微分方程:

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i_c}{C_{sc}} = \frac{1}{C_0 + C_v v_c} \sum_{m=1}^n i_m, \quad (4)$$

其中: i_c 为总的充电电流, n 为充电机的个数.

如图1所示, 具有容性负载的超级电容并联充电系统可以借助状态平均法统一抽象建模成如下^[8]:

$$\begin{cases} L_i \frac{di_i}{dt} = V_{d_i} u_i - i_i r_i - v_c, \\ (C_0 + C_v v_c) \frac{dv_c}{dt} = \sum_{m=1}^n i_m, \end{cases} \quad (5)$$

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

令

$$\begin{cases} f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{bmatrix} -\frac{r_i}{L_i} i_i - \frac{v_c}{L_i} \\ \frac{1}{C_0 + C_v v_c} \sum_{m=1}^n i_m \end{bmatrix}, \\ g_i(x_i) = \begin{bmatrix} V_{d_i} \\ L_i \\ 0 \end{bmatrix}, \\ h_i(x_i) = i_i. \end{cases} \quad (6)$$

进一步, 并联充电系统(5)可以抽象成一类非线性耦合动态互联系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_i(x_i) u_i, \\ y_i = h_i(x_i), \end{cases} \quad (7)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, n$, $x_i = \begin{bmatrix} x_{s_i} \\ x_c \end{bmatrix}$ 是第 i 个子系统的状态, $u_i(t) \in \mathbb{R}$ 是控制输入, $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $g_i(x_i)$ 是有界的非线性 Lipschitz 连续函数, $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq 0$, $g_i(x_i) \neq 0$ 是非等同的, 体现在 $\forall i \neq j$,

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq f_j(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$g_i(x_i) \neq g_j(x_j)$. 从式(7)中可看出, 子系统之间具有公共的耦合变量 x_c , 每个子系统的状态 x_i 依赖于其他子系统的状态, 子系统之间是彼此耦合的.

储能式轻轨车辆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. 为了实现大功率输出, 常常将充电机并联在一起为超级电容充电, 由于线路的不对称及元器件老化, 并联充电系统存在着输出电流不均衡问题, 为了能够在有限时间内实现输出电流均衡, 本文针对抽象化后的非线性耦合动态互联系统(7), 需要设计协同控制器, 实现如下电流输出均衡目标:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |y_i - y_j| = 0. \quad (8)$$

式(8)意味着随着时间的推移, 每个子系统的输出最终要实现协同.

注1 本文所研究的超级电容负载并联充电系统(5), 负载是超级电容容性负载, 建模后系统是一类非线性耦合动态互联系统(7), 其区别于阻性负载的并联模块化DC-DC变换器^[2-3]、直流微电网^[4]. 区别于线性系统, 此类非线性系统的电流输出均衡控制设计及稳定性分析问题具有一定的挑战

和难度,针对此类难题,本文采用基于无源性的分布式协同控制方法加以解决^[9].

2.2 耦合系统无源性

定义 1 称非线性耦合动态互联系统(7),对于给定的 $w_i(u_i, y_i)$ 是耗散的,当存在一个正定函数 $V_i(x_i)$ 使得耗散不等式

$$V_i(x_i(t)) - V_i(x_i(0)) \leq \int_0^t w_i(y(v), u(v)) dv, \forall t \geq 0. \quad (9)$$

对任意输入信号 u_i 成立.此时 $w_i(u_i, y_i)$ 称为供给率, $V_i(x_i)$ 称为存储函数.

定义 2 当供给率 $w_i(u_i, y_i) = y_i^T u_i$,且存储函数 $V_i(x_i)$ 满足 $V_i(0) = 0$ 时,非线性耦合动态互联系统(7)称为是无源的.

定义 3 对非线性耦合动态互联系统(7),如果存在连续可微的非负定函数 $V_i(x_i)$ 以及正定函数 $\zeta_i(x_i) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$ 使得

$$V_i(x_i(t)) - V_i(x_i(0)) \leq \int_0^t [w_i(y_i(v), u_i(v)) - \zeta_i(x_i(v))] dv, \forall t \geq 0, \quad (10)$$

则称系统(7)是严格无源的.

引理 1 对于非线性耦合动态互联系统(7),以下论述是等价的: 1) 系统(7)是无源的; 2) 存在一个连续可微函数 $V_i(x_i) \geq 0$ 使得

$$\begin{cases} L_{f_i} V_i(x_i) = -\zeta_i(x_i), \\ L_{g_i} V_i(x_i) = h_i^T(x_i), \end{cases} \quad (11)$$

其中 $L_{f_i} V_i(x_i)$, $L_{g_i} V_i(x_i)$ 为 V_i 分别关于 f_i , g_i 的李导数,定义为

$$\begin{aligned} L_{f_i} V_i(x_i) &= \frac{\partial V_i}{\partial x_i} f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ L_{g_i} V_i(x_i) &= \frac{\partial V_i}{\partial x_i} g_i(x_i). \end{aligned}$$

注 2 从耗散不等式(9)可以看出,无源性的基本思想是在控制器作用下,若动态系统存储的能量不增加,则可以保证系统的稳定性,研究的系统模型都满足能量守恒规律.因此,从无源性出发设计合适的控制器,就能够保证系统的无源性进而保证系统的稳定性.

3 无源分布式协同控制

本节首先介绍图论基础,其次设计保证控制输入有界的饱和协同控制律,再次,基于子系统存储函数构造李雅谱诺夫函数,在系统满足无源性、通信拓扑满足细致平衡条件的情况下,借助Barbalat等相关引理证明了整个闭环系统的稳定性.

3.1 图论基础

在本文中 n 个子系统之间的通信拓扑利用图

$G(\nu, \varepsilon, A)$ 来描述^[10], $\nu = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 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 4 如果图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 没有自环,则其是简单图^[10-11],即其邻接矩阵对角线元素 $a_{ii} = 0$ 且其拉普拉斯矩阵为 $L = [l_{ij}]_{n \times n}$,

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik}, & j = i, \\ -a_{ij}, & j \neq i. \end{cases} \quad (12)$$

入度矩阵定义为 $D = \text{diag}\{d_i\} \in \mathbb{R}^{n \times n}$,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4可以看出,拉普拉斯矩阵 L 每一行,行和为0,即 $L \cdot \mathbf{1}_n = 0 \cdot \mathbf{1}_n$.意味着 L 有一个特征值为0,即 L 是奇异矩阵^[11].

节点 i 到节点 j 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.

3.2 输入饱和下的协同控制

储能式轻轨并联充电系统的占空比控制输入是有界的,因此本文探讨这一类非线性耦合动态互联系统,在输入饱和下的输出协同控制问题.

本文引入有界的饱和函数 $\phi(\cdot)$ 来保证控制输入的有界性.

定义 5 有界的饱和函数 $\phi(\cdot)$ 满足

- 1) $\phi(\cdot)$ 是Lipschitz连续的;
- 2) $\phi(z) = 0 \Leftrightarrow z = 0$;
- 3) $z\phi(z) > 0, \forall z \neq 0$;
- 4) $\phi_{\min} \leq \phi(z) \leq \phi_{\max}, \forall z \in \mathbb{R}$.

引理 2 设图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 强连通,其对应的拉普拉斯矩阵为 L ,则存在一个向量

$$\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]^T,$$

使得 $\mathbf{p}^T L = 0$ 且 $p_i > 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$.

假设 1 假设非线性耦合动态互联子系统间的通信拓扑图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 是强连通的,且满足细致平衡

条件 $p_i a_{ij} = p_j a_{ji}$, 其中 p_i, p_j 为拉普拉斯矩阵 L 零特征值的左特征向量 $\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]^T$ 的元素^[12].

引理 3 假设其通信拓扑图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 强连通且满足假设 1 中的细致平衡条件, 则

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_i^T \phi(y_j - y_i) = \\ & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i). \end{aligned} \quad (13)$$

证

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i) = \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_i^T \phi(y_j - y_i) - \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_j^T \phi(y_j - y_i), \end{aligned} \quad (14)$$

由于函数 $\phi(\cdot)$ 为有界奇函数, 第 2 项的负号可以代入到括号里面, 得

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i) = \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_i^T \phi(y_j - y_i) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_j^T \phi(y_i - y_j), \end{aligned} \quad (15)$$

将第 2 项中的下标 i 与下标 j 进行交换, 得

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i) = \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_i^T \phi(y_j - y_i) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_j a_{ji} y_i^T \phi(y_j - y_i), \end{aligned} \quad (16)$$

由于 $p_j a_{ji} = p_i a_{ij}$, 得

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i) = \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_i^T \phi(y_j - y_i). \end{aligned} \quad (17)$$

证毕.

引理 4 设 $\varpi(\cdot)$ 为 $[t_0, +\infty)$ 上的一致连续函数, 极限 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \int_{t_0}^t \varpi(v) dv$ 存在并且有界, 则当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\varpi(t) \rightarrow 0$.

定理 1 在固定拓扑下考虑动态互联系统(7), 假设其通信拓扑图 $G(\nu, \varepsilon, A)$ 强连通且满足假设 1 中的细致平衡条件, 设计有界协同控制律:

$$u_i = c \sum_{j \in N_i} a_{ij} \phi(y_j - y_i), \quad (18)$$

其中: 函数 $\phi(\cdot)$ 为有界奇函数; $c > 0$ 为可调节的控制增益; $N_i = \{v_j \in \nu : (v_j, v_i) \in \varepsilon\}$ 为通信拓扑图中节点 i 的邻居集; a_{ij} 为节点 j 到节点 i 的通信权重, 则在控制律(18)作用下, 可实现输出协同目标

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |y_i - y_j| = 0, \quad (19)$$

意味着随着时间的推移, 每个子系统的输出最终实现一致.

证 李雅谱诺夫候选函数选择如下:

$$V = 2 \sum_{i=1}^n p_i V_i, \quad (20)$$

其中: p_i 为拉普拉斯矩阵 L 零特征值的左特征向量 $\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n]^T$ 的元素, V_i 为对应于子系统 i 的存储函数.

将函数 V 沿子系统轨迹关于时间 t 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2 \sum_{i=1}^n p_i \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \dot{x}_i = \\ & 2 \sum_{i=1}^n p_i \left[\frac{\partial V_i}{\partial x_i} (f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_i(x_i) u_i) \right] = \\ & 2 \sum_{i=1}^n p_i [L_{f_i} V_i + L_{g_i} V_i u_i]. \end{aligned} \quad (21)$$

由于耦合子系统满足无源性条件, 则根据引理 1 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= 2 \sum_{i=1}^n p_i [-\zeta_i(x_i) + h_i^T(x_i) u_i] = \\ & 2 \sum_{i=1}^n p_i [-\zeta_i(x_i) + y_i^T u_i]. \end{aligned} \quad (22)$$

将饱和协同控制律(18)代入导函数, 同时借助引理 3, 可推出

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \\ & 2p_i \sum_{i=1}^n [-\zeta_i(x_i) + y_i^T c \sum_{j \in N_i} a_{ij} \phi(y_j - y_i)] = \\ & -2 \sum_{i=1}^n p_i \zeta_i(x_i) + 2c \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} y_i^T \phi(y_j - y_i) = \\ & -2 \sum_{i=1}^n p_i \zeta_i(x_i) - c \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i) \leq \\ & -c \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i) \leq 0. \end{aligned} \quad (23)$$

令 $\varpi(y) = c \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i a_{ij} (y_j - y_i)^T \phi(y_j - y_i)$, 于是可得

$$\dot{V} \leq -\varpi(y). \quad (24)$$

不等式两边积分可得

$$\int_{t_0}^t \varpi(v) dv \leq V(t_0) - V(t). \quad (25)$$

由于 $0 \leq V(t) \leq V(t_0)$, 故可得 $\int_{t_0}^t \varpi(v)dv$ 存在且有界, 根据引理4 (Barbalat引理) 可得, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\varpi(y) \rightarrow 0$ 即 $y_i \rightarrow y_j, \forall i, j$. 意味着随着时间的推移, 在饱和协同控制律(18)作用下, 非线性耦合动态互联系统(7)输出协同目标可以实现. 证毕.

注4 对于本文所研究的超级电容负载并联充电系统, 区别于智能体彼此孤立的多智能体系统, 其是耦合的动态互联非线性系统, 寻找合适的李雅谱诺夫函数证明此类非线性耦合动态互联系统的稳定性是有一定难度的. 本文借助系统的存储函数, 构建了合适的李雅谱诺夫函数, 基于子系统的无源性条件, 严格证明了整个闭环系统的稳定性.

4 实例应用

4.1 仿真

考虑具有超级电容负载的由4个DC-DC变换器并联构成的并联充电系统, 借助状态空间平均法^[8], 其可以建模成一类耦合动态互联系统(7), 其中 $x_i =$

$\begin{bmatrix} i_i \\ v_c \end{bmatrix}$ 是每个子系统的状态, 包含了每个支路的输出

电流 i_i 和负载电压 v_c , $u_i(t)$ 为占空比输入.

并联充电系统相关参数如下: 母线电压

$$V_{d1} = 1335 \text{ V}, V_{d2} = 1272 \text{ V},$$

$$V_{d3} = 1295 \text{ V}, V_{d4} = 1371 \text{ V}.$$

电感

$$L_1 = 5.05 \text{ mH}, L_2 = 5.12 \text{ mH},$$

$$L_3 = 5.95 \text{ mH}, L_4 = 5.01 \text{ mH}.$$

等效电阻

$$r_1 = 3.5 \text{ m}\Omega, r_2 = 3.1 \text{ m}\Omega,$$

$$r_3 = 2.9 \text{ m}\Omega, r_4 = 4.0 \text{ m}\Omega.$$

初始电流为0 A, 在要求的充电时间30 s内, 在实现充电机输出电流均衡的同时, 超级电容的目标充电电压为900 V. 4个充电模块采用如图4所示的通信拓扑, 显然其满足细致平衡条件.

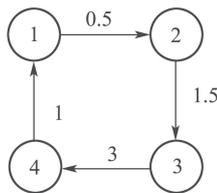


图4 4台充电机之间的通信拓扑

Fig. 4 The communication topology among 4 chargers

在图4给出的通信拓扑下, 针对并联充电系统, 采用本文提出的基于无源性的分布式协同控制方

法, 当控制增益 $c = 5$, 饱和函数 $\phi(x) = \tanh x$ 时图5-6分别给出了输出电流均衡曲线、超级电容电压变化曲线, 仿真结果表明每台充电机的输出电流最终趋于了一致, 并且超级电容的电压达到目标值.

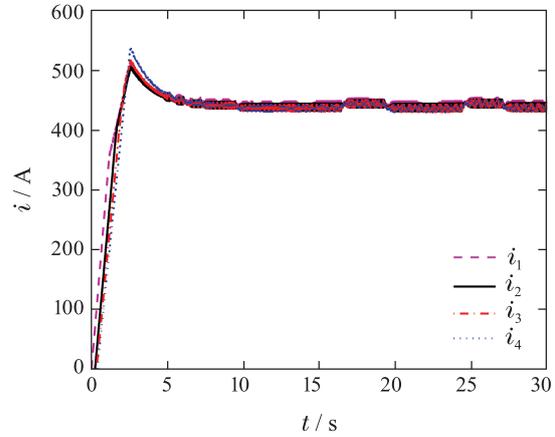


图5 并联充电系统输出电流均衡曲线

Fig. 5 The output current-sharing curves for parallel charging systems

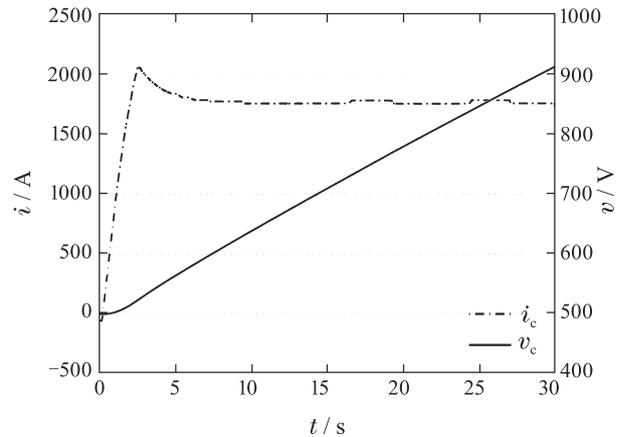


图6 总输出电流及超级电容电压变化曲线

Fig. 6 The evolving curves for the total output current and super-capacitors' voltage

从图5可以看出, 在有界协同控制律作用下, 尽管存在超调现象, 4个充电模块的输出电流仍然实现了同步, 均衡时间约为7 s, 由于在控制律中引入了饱和函数, 在容许的范围内, 存在着一定的稳态误差.

由于通信网络中不可避免存在着时延^[6], 从图7和图8可以看出, 在采用的协同控制律中引入了时延时, 通信时延 $\tau_d = 100 \text{ ms}$, 4个充电模块的输出电流虽也能实现同步, 同步时间约为10 s, 但是与图5相比, 由于通信时延的存在, 图7中的同步时间稍微变长了, 超调量与稳态误差都有所增加.

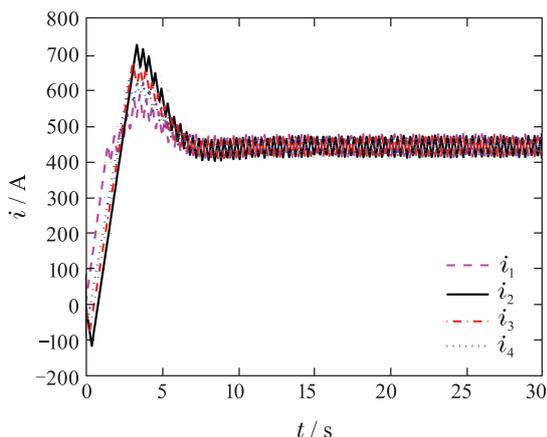


图 7 存在通信时延下的并联充电系统输出电流均衡曲线
Fig. 7 The output current-sharing curves for parallel charging systems when there exist time-delays

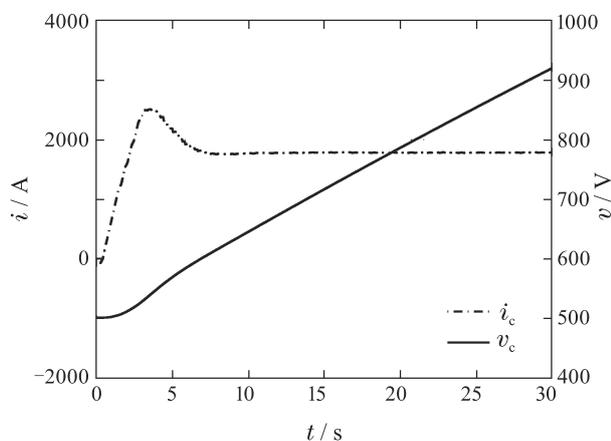


图 8 存在通信时延下的总输出电流及超级电容电压变化曲线
Fig. 8 The evolving curves for the total output current and super-capacitors' voltage when there exist time-delays

图9-10分别给出了即插即用场景下的并联充电系统输出电流均衡曲线、超级电容电压变化曲线,从图9可以看出,在10 s时刻,第4台充电机切出,其余3台充电机承担了总的负载,输出电流同步到了600 A,在20 s时刻,第4台充电机重新加入充电场景,4台充电机输出电流又重新进行了同步,进一步说明本文提出的基于无源性的分布式协同控制方法可以实现即插即用。

5 结论

针对一类容性负载并联充电系统,本文基于无源性协同控制方法解决了其电流输出同步问题.设计了输入饱和下的输出同步控制律,所提出的方法是分布式的,每个子系统只需要知道自身及邻居的输出即可,将整个系统李雅谱诺夫函数构造困难的难题,转化为子系统存储函数的寻找.在系统满足无源性、通信拓扑满足细致平衡条件下,借助子系

统的存储函数,结合Barbalat等相关引理,证明了整个耦合动态互联系统的闭环稳定性.最后,借助具有超级电容负载的由模块化DC-DC变换器并联构成的充电系统,验证了所提出的基于无源性的协同控制方法的有效性。

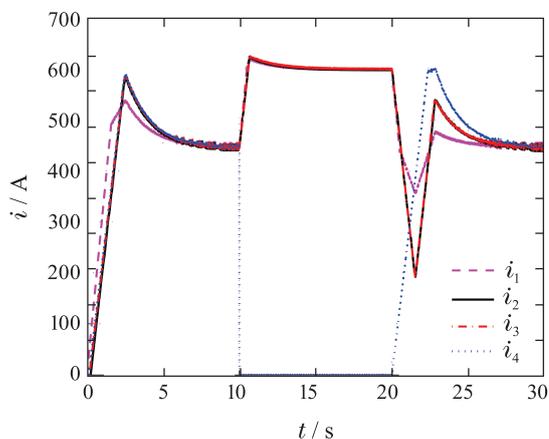


图 9 即插即用场景下的并联充电系统输出电流均衡曲线
Fig. 9 The evolving curves for the total output current and super-capacitors' voltage under plug and play atmospheres

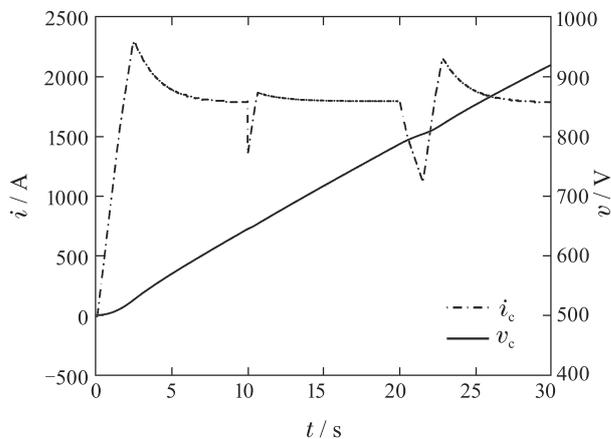


图 10 即插即用场景下的总输出电流及超级电容电压变化曲线
Fig. 10 The evolving curves for the total output current and super-capacitors' voltage under plug and play atmospheres

参考文献:

- [1] MOHDA A, ORTJOHANNA E, MORTONB D, et al. Review of control techniques for inverters parallel operation. *Electric Power Systems Research*, 2010, 80(12): 1477 – 1487.
- [2] 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.
- [3] MOAYEDI S, NASIRIAN V, LEWIS F L, et al. Team-oriented load sharing in parallel dc-dc converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 51(1): 479 – 490.

- [4] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of dc microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4): 2288 – 2303.
- [5] ARCAK M. Passivity as a design tool for group coordination. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(8): 1380 – 1390.
- [6] BASSIE, BENZI F, LUSSETTI L, et al. Communication protocols for electrical drives. *Proceedings of the 21st International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*. Orlando, USA: IEEE, 1995: 706 – 711.
- [7] ZUBIETA L, BONERT R. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(1): 199 – 205
- [8] ERICKSON R W, MAKSIMOVIC D. *Fundamentals of Power Electronics*. London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [9] JI F, XIANG J, LI W, et al. A feedback passivation design for DC microgrid and its DC–DC converters. *Energies*, 2016, 10: 1 – 14.
- [10] DIESTEL R. *Graph Theory*. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [11] 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.
- [12] ZHANG H, LEWIS F L, QU Z. Lyapunov, adaptive, and optimal design techniques for cooperative systems on directed communication graphs. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2012, 59(7): 3026 – 3041.

作者简介:

刘建刚 副教授, 目前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: denan2003@163.com;

杨胜杰 讲师, 博士, 目前研究方向为智慧能源系统, E-mail: wwmmyang@gmail.com.