

控制与决策

Control and Decision

基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略

刘建刚, 杨胜杰, 王仲梅, 李芸

引用本文:

刘建刚, 杨胜杰, 王仲梅, 等. 基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略[J]. *控制与决策*, 2021, 36(8): 1997–2001.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1736>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid
控制与决策. 2021, 36(8): 2034–2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

基于神经网络的电力系统暂态稳定分布式自适应控制

Neural network-based distributed adaptive control for power system transient stability
控制与决策. 2021, 36(6): 1407–1414 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1168>

多航天器系统分布式固定时间输出反馈姿态协同跟踪控制

Distributed fixed-time output feedback attitude coordination tracking control for multiple rigid spacecraft
控制与决策. 2021, 36(5): 1049–1058 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0968>

含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制

Sensor fault-tolerant load frequency control for multi-area interconnected power system with hybrid energy storage system
控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

基于指数趋近律的车载复合储能系统全局滑模控制

Global sliding mode control of vehicle-mounted hybrid energy storage system based on exponential reaching law
控制与决策. 2021, 36(4): 885–892 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0478>

基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略

刘建刚^{1,2}, 杨胜杰^{2†}, 王仲梅¹, 李 芸¹

(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)

摘要: 超级电容作为储能式轻轨的动力源,其性能非常重要,为此提出一种分布式协同控制策略来实现串联超级电容的电压均衡.在信息层将串联超级电容单体视为智能体,均压问题可建模成多智能体系统协同跟踪问题;将串联超级电容单体之间分散的通信网络利用有向图来描述;借助有界的S型饱和函数,基于最近邻原则,设计了有界的控制增益可调节的协同均压控制律;在假定有向图含有生成树的前提下,利用李亚谱诺夫函数,结合拉塞尔不变集原则,证明了整个闭环系统的渐近稳定性;利用仿真验证了所提出的协同控制策略的有效性和可行性.

关键词: 串联; 超级电容; 电压均衡; 协同控制; 多智能体; 分布式

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1736

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 刘建刚,杨胜杰,王仲梅,等.基于协同控制的串联超级电容电压均衡策略[J].控制与决策,2021,36(8):1997-2001.

Voltage equalization strategy for series-connected ultracapacitors based on cooperative control

LIU Jian-gang^{1,2}, YANG Sheng-jie^{2†}, WANG Zhong-mei¹, LI Yun¹

(1. School of Mathematics and Statistics, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China; 2. Institute of Big Data and Internet Innovation, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

Abstract: This paper proposes a distributed cooperative control strategy to balance the voltages of the series-connected ultracapacitors which are the power supply of energy storage light rail vehicles, and their performance is of great significant. Taking each ultracapacitor cell as an agent in the cyber layer, the voltage equalization problem can be formulated as the cooperative tracking problem of multi-agent systems. The sparse communication network among the series-connected ultracapacitors can be modeled by a directed graph. Based on the nearest neighborhood rule, a bounded distributed control law is designed with the aid of a S-like saturation function and the control gains can be tuned according to the system performance. Assuming that the digraph has a directed spanning tree, the asymptotically stability of the overall close-loop system is rigorously proved by the Lyapunov function integrating the Lasalle invariant principle. Simulations verify the effectiveness and feasibility of the proposed cooperative control strategy.

Keywords: series-connected; ultracapacitors; voltage equalization; cooperative control; multi-agent; distributed

0 引言

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.此外,作为一种电化学储能设备,超级电容可以提供较高的功率密度、循环性能和机械强度^[1].

为了满足大功率的要求,成千上万的超级电容单

体彼此进行串联和并联在一起.然而,当大量的超级电容单体串联时,由于单个电容的内在特性,如单体容量、自放电速率、内阻、温度等,使得串联超级电容单体的电压不均衡^[2],这便给如何解决串联超级电容均压问题带来了一个挑战.

经典的解决电压均衡的方法主要包括能量耗散型和能量转移型^[3-6],能量耗散型均压方法是通过将多余的能量借助一些部件耗散掉来实现均压^[1],相关

收稿日期: 2019-12-12; 修回日期: 2020-03-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(11601145); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3264); 湖南省教育厅科研项目(17A116, 18A309).

责任编辑: 毛志忠.

†通讯作者. E-mail: denan2003@163.com.

的技术,如并联电阻法^[5],稳压二极管法等;然而,对于储能式轻轨而言,充电电流非常大,这会使得均衡电流也非常大.若采用能量耗散型均压方法,则大量的能量会被白白浪费掉,储能的目的便不能实现.能量转移型均压的核心思想是将能量从高电压的单体转移到低电压的单体来实现电压均衡^[7-8],其主要基于dc/dc变换器,其中包括反激式变换器^[9]、降压-升压变换器^[10]、切换电容变换器^[11-12]等,尽管这种方法具有较高的能量效率,但也存在着一些弊端,如较长的电压均衡时间、复杂的电路结构等.

串联超级电容本质上是个信息物理融合系统,在信息层将超级电容单体视为智能体,电压均衡控制设计问题则可以转化为多智能体系统的协同跟踪问题^[13-14].对于电压协同跟踪问题,参考电压可以预先计算和设定,每个单体的电压协同地跟踪这一参考目标即可.在信息层每个单体借助通信网络与其邻居进行局部交互,通过这种局部交互,所有超级电容单体的电压会最终趋于一致^[15].尽管超级电容单体通过导线物理串联在一起,这种协同控制方案可以在信息层分布式实现,但对于储能式轻轨上的超级电容而言,其是一种合适的电压均衡方法,本文以此为出发点,探讨串联超级电容的协同控制问题.

1 电压均衡问题描述

超级电容作为储能式轻轨的充电对象,为了满足大功率及储能的要求,很多超级电容单体往往需要进行串并联连接.然而,由于超级电容单体内在的差异性,使得当超级电容单体串联时,单体两端的电压不均衡.这种电压不均衡问题,会降低超级电容的储能效率及寿命,甚至会产生永久性故障.

为了平衡超级电容单体两端的电压,本文提出一个电压均衡电路,如图1所示.在图1中,每个超级电容单体 C_i 与一个相同的均衡电容 C' 并联,同时,开关 S_i 用来决定 C' 是否接入.对于超级电容单体 C_i 与均衡电容 C' 而言,外部的充电电流是相同的,因此,整个均衡电路可以解耦成 n 个独立的控制电路.

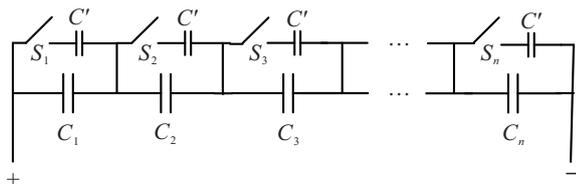


图1 开关电容电压均衡电路

如图1所示,所提出的开关电容电压均衡电路是一个信息物理融合系统,在物理层,每个单体通过导线串联在一起,在信息层超级电容单体之间的通信可

以通过CAN总线通信协议来实现^[16].

借助状态空间平均法,超级电容单体的电压动力学特性描述^[17]如下:

$$\dot{v}_{c_i} = \frac{i_c}{C_i + C'} d_{u_i} + \frac{i_c}{C_i} (1 - d_{u_i}). \quad (1)$$

其中: $v_{c_i} \in R$ 为超级电容单体两端的电压, $i = 1, 2, \dots, n$; i_c 为充电电流; d_{u_i} 为开关 S_i 在每个周期的占空比.

由于物理量 i_c, C_i, C' 为已知的常数,令

$$\frac{i_c}{C_i + C'} d_{u_i} + \frac{i_c}{C_i} (1 - d_{u_i}) = u_i,$$

并在信息层将每个单体看成多智能体系统中的智能体,借助反馈线性化,超级电容电压动力学模型(1)可以转化为如下积分器:

$$\dot{v}_{c_i} = u_i, \quad (2)$$

其中 u_i 为要设计的控制输入.由于电压在有限的范围内变化,输入是有界的.

为了实现超级电容电压均衡目标,应设计一个有界的协同控制律使得

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |v_{c_i}(t) - v_{c_0}| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

其中 v_{c_0} 是参考电压,其可以根据串联超级电容的相关物理参数预先设定和计算出来.

注1 中微型超级电容器已经应用在小型机械设备上,例如电脑内存系统、照相机、音频设备和间歇性用电的辅助设施.大尺寸的柱状超级电容器则多被用于汽车、城轨和自然能源采集等领域.就储能式轻轨车辆、插电式混合动力汽车而言,利用超级电容这种高效率的能源系统,再生制动的能量可以被吸收并重新利用.基于开关分流电阻电路,文献[5]借助静态反馈方法实现了超级电容的分布式控制,本文拟在如图1所示的开关电容均衡电路的基础上,提出针对性的分布式协同控制方法,实现串联超级电容电压均衡.

2 分布式协同电压均衡控制

本节首先在信息层将串联超级电容单体之间的通信拓扑利用图来刻画;然后,基于最近邻原则,借助饱和函数,结合与通信拓扑图相关的拉普拉斯矩阵与牵制增益矩阵,设计分布式协同控制律;最后,选取依赖于通信拓扑结构的李亚谱诺夫函数矩阵,证明闭环系统的稳定性.

2.1 电压均衡控制器设计

在信息层,将每个超级电容单体视为智能体,可以基于分布式协同控制理论来设计有界的电压均衡控制器.由于超级电容单体之间的通信可以利用CAN总线通信协议单向实现^[16],其通信网络可以建

模成有向图 $G(\nu, \varepsilon, \mathcal{A})$.

假设1 如图2所示,有向图 $G(\nu, \varepsilon, \mathcal{A})$ 具有一棵有向生成树,至少有一个根节点对应的牵制增益 $g_i > 0$,即至少一个位于根节点的超级电容单体可以知道参考电压 v_{c_0} 的信息.

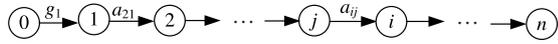


图2 串联超级电容信息层有向通信拓扑

为了便于控制器的设计,定义局部电压跟踪误差如下:

$$e_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(v_{c_j} - v_{c_i}) + g_i(v_{c_0} - v_{c_i}). \quad (4)$$

其中: $N_i = \{v_j \in \nu : (v_j, v_i) \in \varepsilon\}$ 为节点 v_i 的邻居集; a_{ij} 为有向图所对应的邻接矩阵 A 中的元素,其刻画了节点 j 到节点 i 的通信权重, $a_{ij} > 0$ 意味着对于单体 i ,其可以获得单体 j 的电压信息; g_i 为牵制增益,其表示连接虚拟节点与根节点的边的权值; $g_i > 0$ 表示位于节点 i 的超级电容单体可以获知参考电压 v_{c_0} 的信息.

由于超级电容单体的电压在有限范围内变化,本文引入有界的S型饱和函数 $\phi(\cdot)$ 来保证控制输入的有界性.

定义1 有界的S型饱和函数 $\phi(\cdot)$ 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) $\phi_{\min} \leq \phi(z) \leq \phi_{\max}, \forall z \in R$.

在有向通信拓扑下,借助局部电压跟踪误差 e_i 及饱和函数 $\phi(\cdot)$,基于最近邻原则,可以设计如下的协同电压均衡控制律:

$$u_i = c_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} \phi(v_{c_j} - v_{c_i}) + g_i \phi(v_{c_0} - v_{c_i}) \right). \quad (5)$$

其中: $c_i > 0$ 为待设计比例控制增益;括号内第1项为一致性项,其作用是使得每个超级电容单体的电压彼此匹配;第2项为跟踪虚拟领导者项,其作用是使超级电容单体的电压 v_{c_i} 跟踪参考目标 v_{c_0} .

将协同电压均衡控制律(5)代入系统状态方程(2),可得子系统闭环状态方程

$$\dot{v}_{c_i} = c_i \left(\sum_{j \in N_i} a_{ij} \phi(v_{c_j} - v_{c_i}) + g_i \phi(v_{c_0} - v_{c_i}) \right). \quad (6)$$

由控制律(5)可以看出,每个超级电容单体与邻居电容单体、虚拟领导单体进行局部交互,可以实现电压协同目标,所设计的控制律是基于子系统自身负反馈、子系统之间正反馈这一协同控制器设计原则设计的.

考虑到整个网络通信拓扑,可以得到全局电压跟踪误差

$$e = -(L + G)(v_c - v_0) = -(L + G)\delta. \quad (7)$$

其中: $e = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$; $v_c = [v_{c_1}, v_{c_2}, \dots, v_{c_n}]^T$ 为全局电压向量, $v_0 = \mathbf{1}_n \otimes v_{c_0}$, \otimes 为Kronecker乘积;牵制矩阵 $G = \text{diag}\{g_i\} \in R^{n \times n}$ 是对角矩阵; L 为对应于有向图 $G(\nu, \varepsilon, \mathcal{A})$ 的拉普拉斯矩阵; $\delta = [v_{c_1} - v_{c_0}, v_{c_2} - v_{c_0}, \dots, v_{c_n} - v_{c_0}]^T$ 为全局电压非一致性向量.

进而,将子系统协同电压均衡控制律(5)代入系统状态方程(2)得到闭环子系统(6)后,借助拉普拉斯矩阵 L 和牵制增益矩阵 G ,当满足

$$\begin{aligned} \phi(v_{c_i} - v_{c_0}) &= \phi(v_{c_i}) - \phi(v_{c_0}), \\ \phi(v_{c_i} - v_{c_j}) &= \phi(v_{c_i}) - \phi(v_{c_j}) \end{aligned}$$

时,可以得到整个系统闭环状态方程

$$\dot{v}_c = -C((L + G)\phi(v_c - v_0)), \quad (8)$$

其中 $C = \text{diag}\{c_i\} \in R^{n \times n}$ 为控制增益矩阵.

2.2 闭环系统稳定性分析

定理1 在信息层有向通信拓扑下考虑串联超级电容系统(2),在假设1中有向图 $G(\nu, \varepsilon, \mathcal{A})$ 至少含有一棵生成树,对于处于根节点的超级电容单体牵制增益 $g_i > 0$,以及每个子系统(6)控制增益 $c_i > 0$,采用所设计的分布式协同控制律(5),电压均衡目标(3)可以实现.也就是说,每个超级电容单体的电压 v_{c_i} 最终趋于一致并跟踪期望的参考目标电压 v_{c_0} ,整个闭环系统(8)渐近协同稳定.

证明 为了证明整个闭环系统(8)的稳定性,可以转化为分析全局非一致向量 δ 对应的动态系统的稳定性.

选取李亚谱诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} \delta^T \delta, \quad (9)$$

将 V 沿系统状态轨迹关于时间 t 求导,并将闭环系统状态方程代入,得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} (\dot{\delta}^T \delta + \delta^T \dot{\delta}) = \\ &= -\frac{1}{2} \delta^T [(L + G)^T C + C(L + G)] \phi(\delta). \end{aligned} \quad (10)$$

又由于在假设1下,对应有向图 $G(\nu, \varepsilon, \mathcal{A})$ 至少含有一棵生成树, $L + G$ 为非奇异矩阵^[13],且 $\min\{\text{Re}(\lambda_i(L + G))\} > 0$.已知控制增益 $c_i > 0$,进一步变形可得

$$\begin{aligned} &= -\frac{1}{2} \delta^T [(L + G)^T C + C(L + G)] \phi(\delta) \leq \\ &= -\min\{[c_i \text{Re}(\lambda_i(L + G))]\} \delta^T \phi(\delta). \end{aligned} \quad (11)$$

由定义1饱和函数性质2)和3)可知, δ 与 $\phi(\delta)$ 具有相同的符号, 于是可得

$$-\frac{1}{2}\delta^T[(L+G)^T C + C(L+G)]\phi(\delta) \leq -\min\{[c_i \operatorname{Re}(\lambda_i(L+G))]\}\delta^T\phi(\delta) \leq 0, \quad (12)$$

即 $\dot{V} \leq 0$, 全局非一致向量 δ 稳定.

注意到 $\dot{V} \equiv 0$ 意味着全局非一致向量 $\delta = 0$, 即对于每个超级电容单体而言 $\delta_i = 0$. 借助拉塞尔不变集原理, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时, 有 $\delta(t) \rightarrow 0$, 即 $\lim_{t \rightarrow +\infty} |\delta(t)| = 0$. 也就是说, 全局非一致向量 δ 对应的动态系统渐近稳定.

进一步, 由 $\delta_i = v_{c_i} - v_{c_0}$ 可得

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} |v_{c_i}(t) - v_{c_0}| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

在图1所示的拓扑结构下, 采用所设计的分布式协同控制律(5), 每个超级电容单体的电压 v_{c_i} 最终趋于一致并跟踪期望的参考目标电压 v_{c_0} , 整个闭环系统(8)渐近协同稳定. \square

3 实例应用

针对如图1所示的串联超级电容系统, 在信息层建模成如图2所示的有向图通信拓扑下, 利用仿真来验证所提出的电压均衡方法的有效性.

加权矩阵 A 的元素 a_{ij} 设计原则如下: 对于所对应的有向图 $G(\nu, \varepsilon, A)$, 若 $(v_j, v_i) \in \varepsilon$, 则 $a_{ij} = i \times j/n$. 第1个节点为根节点, 即只有一个节点能够获取参考电压 v_{c_0} 的信息, 即 $g_1 = 1$. 在控制律中, 选择有界的S型饱和函数来保证控制输入的有界性.

在仿真中, 首先考虑由5个单体串联构成的系统, 即 $n = 5$. 协同电压均衡控制律中, 控制增益 $c_i = 100 + i/10, i = 1, 2, \dots, n$. 在充电模式下, 参考目标电压 $v_{c_0} = 2.7 \text{ V}$, 利用所提出的电压均衡策略, 相应的电压均衡曲线如图3所示, 其为非零初始条件下充电模式电压均衡结果, 电压初值 $v_{c_1}(0) = 0.3 \text{ V}, v_{c_2}(0) = 0.8 \text{ V}, v_{c_3}(0) = 1.0 \text{ V}, v_{c_4}(0) = 2.0 \text{ V}, v_{c_5}(0) = 2.3 \text{ V}$.

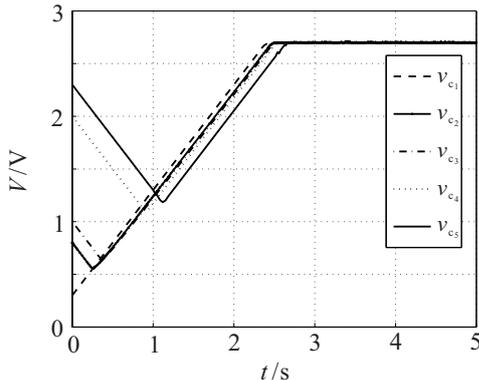


图3 非零初始条件充电模式下电压均衡曲线

在图3中可以看出, 第1个超级电容单体的电压收敛速度相对于其他单体是最快的, 这是因为在图2中只有第1个单体可以直接获知参考电压的信息, 即相对于其他单体, 第1个单体离虚拟领导者的距离是最近的, 其余的单体只能间接地获取参考电压的信息.

在充电模式下, 针对串联超级电容, 采用集中式均压控制方法, 当主模块在2.5s发生故障时, 由图4可以看出, 整个系统失稳, 无法实现电压均衡的目标. 然而, 采用本文的分布式协同控制方法, 尽管模块5在2.5s发生了故障, 经过短暂的调节后, 电压均衡的目标仍然可以实现, 验证了本文所提出方法的优越性.

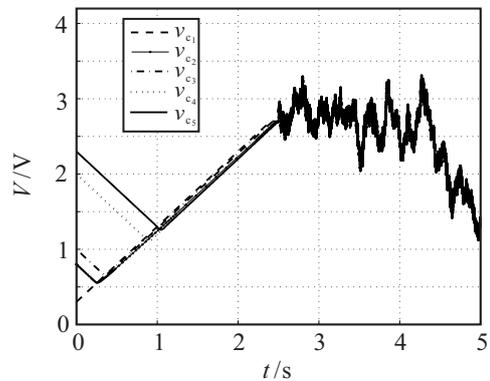


图4 串联超级电容采用集中式均压方法主模块发生故障时的电压曲线

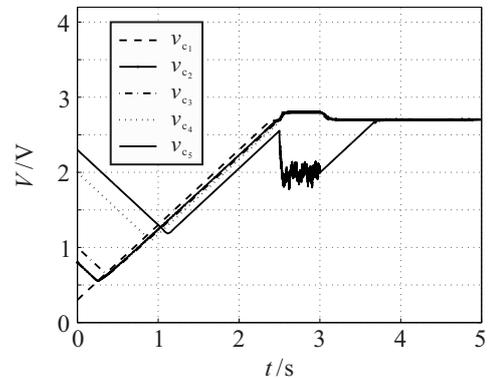


图5 模块5发生故障时串联超级电容采用分布式协同控制方法下的电压均衡曲线

4 结论

本文针对串联超级电容系统, 提出了分布式协同控制方案. 在信息层, 每个单体只需要知道自己及邻居的状态信息, 借助只含有生成树的通信网络, 通过局部交互, 即可实现全局的电压协同目标. 借助非线性饱和函数, 所提出的控制律是有界的, 其可在信息层分布式实现. 借助李亚谱诺夫函数, 证明闭环系统是稳定的. 仿真实验验证了所提出的电压均衡控制方法的有效性和可行性.

参考文献(References)

- [1] Linzen D, Buller S, Karden E, et al. Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1135-1141.
- [2] Satou D, Hoshi N, Haruna J. Characteristics of cell voltage equalization circuit using LC series circuit in charging and discharging states[C]. IEEE International Conference of the Industrial Electronics Society. Vienna: IEEE, 2013: 514-519.
- [3] Cao J, Schofield N, Emadi A. Battery balancing methods: A comprehensive review[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin: IEEE, 2008: 1-6.
- [4] Daowd M, Omar N, van den Bossche P, et al. Passive and active battery balancing comparison based on Matlab simulation[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Chicago: IEEE, 2011: 1-7.
- [5] Luo Z, Sun Z F, Peng J M. Distributed control of multiple supercapacitors via static feedback[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 3: 1-8.
- [6] Gallardo-Lozano J, Romero-Cadaval E, Isabel Milanes-Montero M. Battery equalization active methods[J]. Journal of Power Sources, 2014, 246: 934-949.
- [7] Xu A, Xie S, Liu X. Dynamic voltage equalization for series-connected ultracapacitors in EV applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3981-3987.
- [8] Uno M, Tanaka K. Double-switch single-transformer cell voltage equalizer using a half-bridge inverter and a voltage multiplier for series-connected supercapacitors[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(9): 3920-3930.
- [9] Hussain A, Lee H, Sul S. Forward fly-back voltage balancing circuit for series connected super capacitors using digital control[C]. International Conference on Renewable Energy Research and Applications. Madrid, 2013: 377-382.
- [10] Tang M, Stuart T. Selective buck-boost equalizer for series battery packs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(1): 201-211.
- [11] Baughman A C, Ferdowsi M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2277-2285.
- [12] Speltino C, Stefanopoulou A, Fiengo G. Cell equalization in battery stacks through state of charge estimation polling[C]. Proceedings of the 2010 American Control Conference. Baltimore, 2010: 5050-5055.
- [13] Li Z, Duan Z, Chen G. Consensus of multiagent systems synchronization of complex networks: A unified H_∞ viewpoint[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2010, 57(1): 213-224.
- [14] Yang Y. Cooperative control of voltage equalization for multiple supercapacitors[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2018, 482: 145-153.
- [15] Abhinav S, Binetti G, Davoudi A, et al. Toward consensus-based balancing of smart batteries[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fort Worth: IEEE, 2014: 2867-2873.
- [16] Bassi E, Benzi F, Lusetti L, et al. Communication protocols for electrical drives[C]. Proceedings of IECON' 95-21st Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. Orlando: IEEE, 1995: 706-711.
- [17] Erickson R W, Maksimovic D. Fundamentals of power electronics[M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [18] Saber R O, Murray R M. Consensus protocols for networks of dynamic agents[C]. Proceedings of the American Control Conference. Denver, 2003: 951-956.

作者简介

刘建刚(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事协同控制理论及其应用等研究, E-mail: jgangliu@csu.edu.cn;

杨胜杰(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事智能电网优化的研究, E-mail: denan2003@163.com;

王仲梅(1979—), 女, 讲师, 从事运筹优化的研究, E-mail: 2010771648@qq.com;

李芸(1980—), 女, 讲师, 博士, 从事学习算法设计及优化的研究, E-mail: 573340539@qq.com.

(责任编辑: 孙艺红)