

# 一种用于城轨制动能量存储系统的控制策略

张逸成, 吴璐璐, 韦 莉, 沈小军

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 为克服城轨车辆工况辨识困难问题, 提出基于牵引变电站特性的控制策略, 设计了一种带有比例积分环节双环电流型滑模变结构恒频控制器, 替代普通比例积分(proportion-integral, PI)控制器, 以实现该控制策略并改善能量存储系统性能. 针对阻容性负载, 给出一种提高启动速度的方法. 最后通过仿真试验对控制有效性进行了验证, 结果表明该控制策略有效, 且控制性能优于普通 PI 控制.

**关键词:** 控制策略; 滑模变结构; 制动能量存储; 阻容负载; 快速启动

**中图分类号:** TM 46; TP 273

**文献标识码:** A

## A Control Strategy for Metro Energy Storage System

ZHANG Yicheng, WU Lulu, WEI Li, SHEN Xiaojun

(College of Electronics & Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A control strategy based on traction substation characteristic is proposed in order to surmount metro vehicle behaviour identification difficulties. To implement the control strategy and improve the performance of energy storage system, a constant-frequency sliding mode controller of double loop current mode with PI compensation is designed to replace an ordinary PI controller. Furthermore, a method to improve the speed of start-up characteristics is proposed for resistive and capacitive loading. Finally, the simulation results verify the effectiveness of this control strategy where performance exceeded an ordinary PI control.

**Key words:** control strategy; sliding mode; energy storage system; resistance-capacitance load; quick start

动使用, 通常这部分能量占到车辆消耗牵引能量的 40%<sup>[1]</sup>. 当无其他车辆吸收再生制动能量时, 则需能量存储系统吸收并保存在超级电容内, 直到线路有其他车辆取流时再释放出去.

鉴于城轨车辆运行工况复杂, 且上下行电流大小及方向不断变化, 难以直接辨识车辆制动与启动, 故如何制定能量存储系统吸收与释放策略是控制策略需解决的一个难题. 针对城轨车辆工况辨识十分困难的问题, 本文从牵引变电站外特性出发, 得到了一种可靠、实用、快捷的吸收与释放策略.

考虑到超级电容负载与一般纯电阻负载、蓄电池负载等不同, 属阻容性负载, 其端电压会随储能能量增减而不断变化, 属一类动态负载. 其动态特性使得系统阶次升高, 不利系统稳定, 而大功率双向 DC/DC(直流/直流)变换器本身就是一种时变、强非线性开关电路<sup>[2]</sup>, 这更增加了控制难度. 如何控制主电路, 提供对吸收与释放策略的良好支持, 是控制策略需解决的另一难题.

文献[3]采用双闭环 PI 控制器来控制能量存储系统, 但未计及超级电容器组并联滤波电容, 其系统阶次仍为二阶. 文献[4]提出了采用更为先进的滑模变结构方法来控制 DC/DC 变换器, 但负载为纯阻性, 也未解决滑模恒频率控制问题.

本文以 Buck(降压型变换)为例, 提出了一种带比例积分环节的双环电流型滑模变结构控制方案, 具有恒频率控制与快速启动特点, 取得了良好的控制效果, 可替代普通 PID(比例积分微分)控制.

## 1 能量存储系统吸收与释放策略

### 1.1 城轨能量存储系统结构

为节约能源, 减少机械制动磨损, 现代城轨车辆都将再生制动能量反馈回直流电网以供其他车辆启

收稿日期: 2009-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877054/E07)

作者简介: 张逸成(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新型电气设备及控制. E-mail: kzjc@263.net

图1a为DC 1 500 V城轨供电系统原理图.能量存储系统本体架设在牵引变电站内,电气连接点在牵引整流器输出端根部,这样可有效利用牵引整流器输出电流的单向特性,方便控制策略制定.

图1b为能量存储系统基本原理图,主要由断路器、带输入滤波器的单桥臂结构双向DC/DC变换器、能量存储器件(这里为超级电容器组)组成.通过控制IGBT1(insulated gate bipolar transistor,绝缘栅双极晶体管)与IGBT2管开通与关断,就可控制能量双向流动.当IGBT1斩波,IGBT2关断时,电路工作在Buck模式,能量从网侧向容侧充电;当IGBT1关断,IGBT2斩波时,电路工作在Boost(升压型变换)模式,能量从容侧向网侧放电.

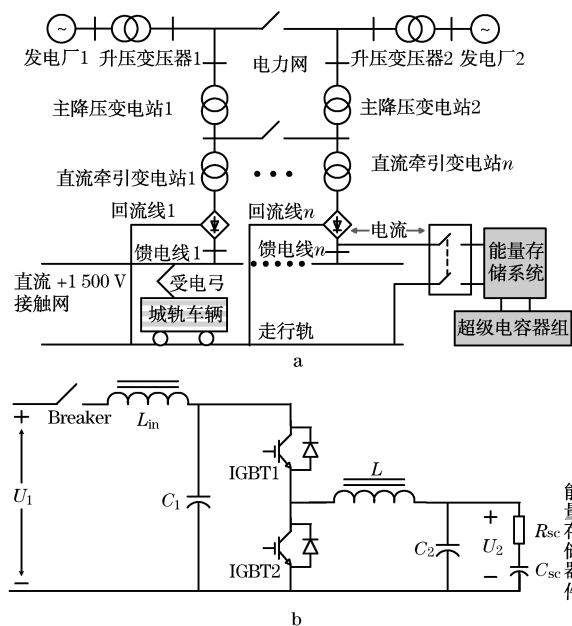


图1 城轨供电系统与能量存储系统原理图

Fig.1 Schematic of the power supply system of the urban mass transit and energy storage system

## 1.2 吸收与释放策略

由于城轨牵引变电站分别向左右两个供电区间供电,且每个区间均分上下行,又允许电流双向流动<sup>[5]</sup>,故牵引与再生电流混合在一起,且流向复杂,无法辨识车辆工况.

当城轨车辆制动且又无其他车辆吸收时,会导致再生能量涌向牵引变电站.而牵引变电站牵引整流器组能量的单向传递性,导致网压升高与二极管截止.故吸收策略可为:牵引整流器二极管截止(即电流为零),电网电压大于接触网空载电压  $U_0$ ,且持续大于某一时间阈值以上,就等效视为有车辆制动,

此时吸收能量.

由于牵引变电站承担供电区间内城轨车辆众多,电流混合在一起,故无法看出是否有车辆启动.考虑到能量存储系统的目的是节能,故不管有无车辆启动,只要在牵引变电站有电流输出时,能量存储系统只要承担一部分牵引电流,就能减少牵引变电站单位时间内输出能量,达到节能目的.故释放策略可为:只要检测到有牵引电流  $I_s$  往外流出,就等效视为有车辆启动,此时释放一定比例的电流.一般来说,这个比例不应大于等于  $I_s$ ,否则会使牵引变电站实际电流为零,导致释放判据消失.

## 1.3 吸收与释放策略对底层控制策略要求

能量存储系统吸收策略对底层控制的要求高于释放策略,因为当电网电压升高到一定阈值  $U_{\max}$  (电网最高电压)时,车辆上(或地面上)的制动电阻会投入工作,消耗再生制动能量.故要求能量存储系统响应要快于制动电阻.

除要求系统动态性能高外,还要求系统在电压电流大范围扰动情况下,有较高稳定性.为满足这些要求,本文提出一种带比例积分环节的双环电流型滑模变结构恒频控制方案.

## 2 滑模变结构控制算法

### 2.1 滑模变结构特点

从图1b中可看出,系统工作过程中受开关量控制,系统结构在两个子拓扑间来回切换,因此它具有变结构特点,可直接利用变结构方法对其进行分析与控制,而不需任何简化与近似.

### 2.2 滑模变结构算法设计

滑模变结构控制要求考虑系统<sup>[6]</sup>

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (1)$$

式中:  $x$  为系统状态;  $u$  为系统控制函数;  $t$  为时间; 且  $x \in \mathbf{R}^n$ ,  $u \in \mathbf{R}^m$ ,  $t \in \mathbf{R}$ .

需确定切换函数矢量

$$S = S(x), S \in \mathbf{R}^m \quad (2)$$

且需求解控制函数

$$u_i(x) = \begin{cases} u_i^+(x), & S_i(x) > 0 \\ u_i^-(x), & S_i(x) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $u_i^+(x) \neq u_i^-(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , 使得满足滑模态的存在性、可达性与稳定性条件.因此,滑模变结构控制算法设计关键在于滑模面选取与控制率

设计<sup>[7]</sup>.

对于 Buck 电路,可列出其状态空间平均模型

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u_{eq} \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1/L & 0 \\ 1/C_2 & -1/R_{sc}C_2 & 1/R_{sc}C_2 \\ 0 & 1/R_{sc}C_{sc} & -1/R_{sc}C_{sc} \end{bmatrix}; \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_L \\ u_{C_2} \\ u_{C_{sc}} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} U_1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; u_{eq} \text{ 为等效控制占空比.}$$

要使系统在  $\mathbf{S}(\mathbf{x})$  上滑动,需满足滑模控制存在性、可达性与稳定性条件<sup>[7]</sup>

$$L_g \mathbf{S} \neq 0 \quad (5)$$

$$0 < u_{eq} < 1 \quad (6)$$

式中:  $L_g$  为李氏函数.

令:

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}) = K_1 x_1 + x_2 \quad (7)$$

式中:  $x_1 = I_{ref} - i_L$ ,  $I_{ref}$  为电流给定参考值;  $x_2 = \int x_1 dt$ ;  $K_1$  为参考系数.

由式(5)~(7)得

$$L_g \mathbf{S} = \langle \nabla \mathbf{S}, \mathbf{g} \rangle = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial i_L} & \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u_{C_2}} & \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial u_{C_{sc}}} \end{bmatrix} \mathbf{g} = \begin{bmatrix} -K_1 - i_L & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1/L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{g} = \mathbf{B}$ .

根据关系  $\dot{\mathbf{S}} = 0$  与式(4)

$$\dot{\mathbf{S}} = K_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2 = K_1(-\dot{i}_L) + x_1 = K_1 \left( \frac{u_{C_2}}{L} - \frac{U_1}{L} u_{eq} \right) + x_1 = 0 \quad (9)$$

显然,欲满足滑模面存在性与可达性条件,需取控制律为

$$u = \begin{cases} 0 & \mathbf{S}(\mathbf{x}) < 0 \\ 1 & \mathbf{S}(\mathbf{x}) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

由滑模控制存在性、可达性条件  $\dot{\mathbf{S}} \cdot \mathbf{S} < 0$ ,可得

$$\begin{cases} K_1 \frac{u_{C_2}}{L} + x_1 < 0 \\ K_1 \left( \frac{u_{C_2}}{L} - \frac{U_1}{L} \right) + x_1 > 0 \end{cases} \quad (11)$$

对于式(9),在满足式(11)条件下,可满足条件式(6),即满足滑模控制存在性与可达性条件,因此这一滑模面的选取是合理的.

应指出,滑模运动区域位于两条直线 L1 与 L2 之间,如图 2 所示.当系统运动到滑模区时,会快速收敛于滑模切换函数  $\mathbf{S}(\mathbf{x})$ .

$$\begin{cases} \text{L1: } K_1 \frac{u_{C_2}}{L} + x_1 = 0 \\ \text{L2: } K_1 \left( \frac{u_{C_2}}{L} - \frac{U_1}{L} \right) + x_1 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

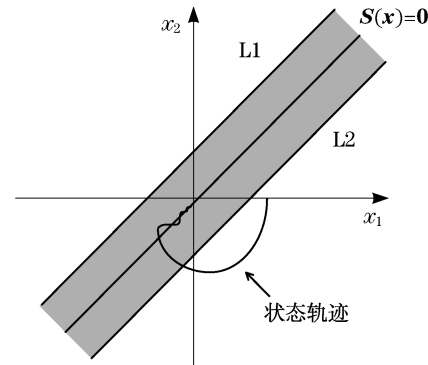


图2 滑模控制运行轨迹示意图

Fig.2 Running locus of the sliding mode

考虑到超级电容负载最大电流限制,故其控制规律如下,其中  $U_{ref}$  为电压给定参考值.

当  $I_{ref} < I_{max}$  时,

$$I_{ref} = k_1 (U_{ref} - U_1) + k_2 \int (U_{ref} - U_1) dt \quad (13)$$

当  $I_{ref} \geq I_{max}$  时,

$$I_{ref} = I_{max} \quad (14)$$

## 2.3 滑模变结构恒频控制

为使设计的滑模控制器可应用于工程领域,应使其开关频率恒定不变,以方便 DC/DC 变换器设计.目前较为有效的方法为基于等效控制理论的定频滑模控制方法(PWM-SMC)与基于给定三角波的滑模控制方法(RTW-SMC)<sup>[8]</sup>,考虑到后者设计简单,对负载变化不敏感,本文采取 RTW-SMC 恒频控制.

RTW-SMC 通过结合滑模面函数环路(SMC)与给定三角波环路(RTW)产生定频控制,其原理如图 3 所示.三角波幅值  $a$  应不小于滑模函数变化范围.

## 2.4 阻容负载快速启动方法

阻容性负载与普通电阻性负载的区别在于,阻容性负载不仅会提高系统阶次,影响系统稳定性,还会带来启动过慢问题.因为当 Buck 电路占空比从零不断增加时,Buck 电路平均输出电压将会有一段时间小于超级电容器组端压,这导致无法对超级电容进行充电,直到 Buck 电路占空比到达最小充电占空

比  $D_{\min}$ , 充电过程才真正开始.

$$D_{\min} = \frac{U_{20}}{U_{10}} \quad (15)$$

式中:  $U_{10}$  为网侧初始网压;  $U_{20}$  为容侧初始端压.

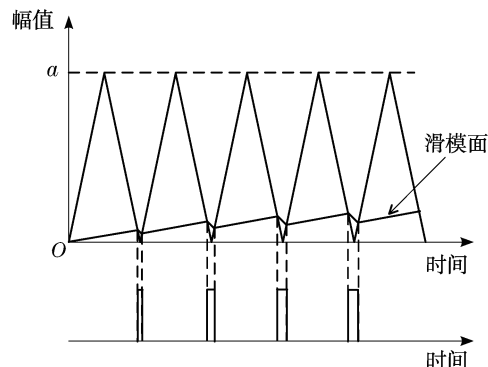


图3 滑模恒频 PWM 波发生原理图

Fig.3 PWM generation principle of the constant-frequency sliding mode

而电阻性负载不存在初始端压问题,故最小充电占空比  $D_{\min}$  为零.这是电阻性负载与阻容性负载的重要区别之一.

为加快能量存储系统启动速度,可让 IGBT1 管起始占空比从  $D_{\min}$  开始,这样可加快 DC/DC 变换器启动速度.

### 3 仿真试验验证

为检验控制策略,不仅建立了双向 DC/DC 变换器模型,还建立了城轨供电系统简化模型.模型参数含义与图 1b 相对应,取值为:  $L = 1\,700\,\mu\text{H}$ ,  $C_1 = C_2 = 800\,\mu\text{F}$ ,  $L_{\text{in}} = 1\,000\,\mu\text{H}$ ,  $f_s = 15\,\text{kHz}$ ,  $C_{\text{sc}} = 41.666\,7\,\text{F}$ ,  $R_{\text{sc}} = 0.156\,\Omega$ ,而网侧电压取  $1\,660\,\text{V}$ ,内阻可取  $0.040\,\Omega$ .

为验证控制系统响应速度,展示了滑模控制、普通 PI 控制与快速启动方法不同组合下的启动过程仿真曲线,如图 4 所示.其中滑模控制动态响应特性要优于普通 PI 控制,而快速启动法可加速启动过程,对于普通 PI 算法,加速效果更为明显.分析其原因,是由于滑模变结构控制能充分利用系统本身结构特性,沿着较快的系统运动轨迹到达平衡点.而 PI 调节本身仅依靠对不同误差以不同同步幅来调节,调节能力有限.可见,由于变结构控制本身充分发挥了主电路快速响应潜力,故其动态响应优良,而稳态精度与 PI 控制基本一致.

为考验控制系统稳定性,可采用负载突变的方法来验证.当超级电容器组内阻在第  $0.5\,\text{s}$  时刻突变为原来的  $2.5$  倍时,其充电电流变化如图 5 所示.可以看出,滑模控制对于负载大范围扰动有着较好的稳定性与抗干扰性,而普通 PI 控制则需较长时间恢复,说明滑模控制在稳定性与抗干扰性方面较优.

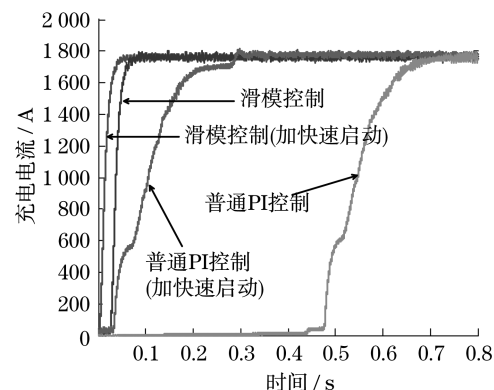


图4 能量存储系统启动波形

Fig.4 Enabling waveform of energy storage system

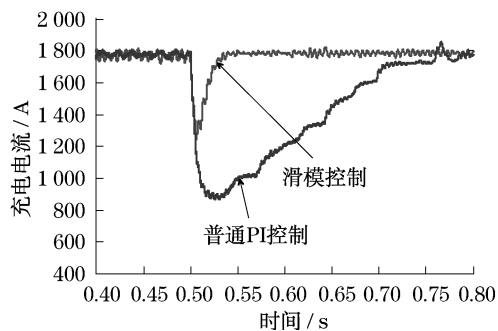


图5 负载大范围扰动下能量存储系统启动波形

Fig.5 Enabling waveform of energy storage system with large-disturbance load

为验证控制策略有效性,采集了不同控制下,车辆制动时的电网电压波形.从图 6 可看出,当车辆制动时,电网电压会上升到  $1\,800\,\text{V}$ ,此时制动电阻工作,将电压稳定在  $1\,800\,\text{V}$ ;当滑模控制的能量存储系统将电网电压稳定在约  $1\,750\,\text{V}$  时,制动电阻不会投入工作,时间裕量较大;对于普通 PI 控制的能量存储系统,虽然制动电阻也未投入工作,但时间裕量很小,且需较长时间才能将网压稳定在  $1\,750\,\text{V}$ ,电网波动也较大.究其原因,是 PI 调节速度较慢,对快速变化的工况响应不够快造成的.

综合分析,可得出滑模变结构控制在抗干扰性与快速性方面均优于普通 PI 控制,其不足之处在于涉及的理论知识较难,算法较复杂.

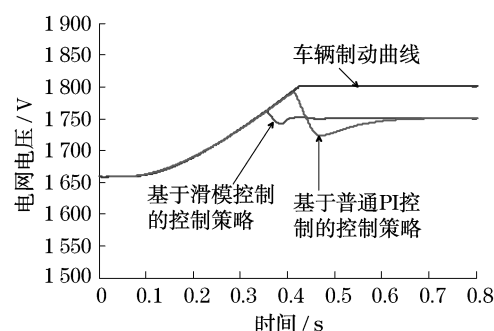


图6 车辆制动时电网电压波形

Fig.6 Network voltage waveform during vehicle braking

## 4 结论

提出了一种基于牵引变电站外特性的能量存储系统控制策略,该策略简单、快捷,可有效规避车辆工况难以直接识别的难题.

鉴于能量存储系统是一类强非线性时变电力电子开关电路,加之工作环境可能存在电压波动、负载突变等扰动,故寻找更为先进的控制方法很有必要.以 Buck 为例,提出了更为先进的滑模变结构控制来实现能量存储策略.在设计了一种带比例积分的双环电流型滑模变结构恒频控制器后,还对阻容性负载与电阻性负载做了讨论,得出一种提高阻容性负载启动速度的方法.最后,利用仿真工具验证了本文提出的控制策略的有效性.仿真结果表明,所提出的底层控制方法优于普通 PI 控制.

### 参考文献:

[1] 赵立峰,张发明.北京地铁5号线再生电能吸收装置[J].现代城市轨道交通,2008(1):5.

ZHAO Lifeng, ZHANG Faming. Regeneration energy recovery system for Beijing No. 5 Metro Line[J]. Modern Urban Transit, 2008(1):5.

[2] 吴爱国,李际涛,黄瑞祥,等. DC-DC 变换器的大信号建模及鲁棒控制方法[J]. 电子学报,2001,29(5):1.

WU Aiguo, LI Jitao, HUAN Ruixiang, et al. Large signal modeling and robust control for DC-DC converters[J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 29(5):1.

[3] 张慧妍,韦统振,齐智平. 超级电容器储能装置研究[J]. 电网技术,2006,50(8):92.

ZHANG Huiyan, WEI Tongzhen, QI Zhiping. Study on ultra capacitor energy storage[J]. Power System Technology, 2006, 50(8):92.

[4] 张黎,丘水生. 滑模控制开关变换器的分析与实现[J]. 微电子学,2005,35(3):260.

ZHANG Li, QIU Shuisheng. Analysis and implementation of switching converter with sliding mode control [J]. Microelectronics, 2005, 35(3):260.

[5] 上海市建设委员会科学技术委员会. 地铁一号线工程[M]. 上海:上海科学技术出版社,1998.

Science and Technology Commission of Shanghai Construction Committee. Project of Metro Line One[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1998.

[6] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

LIU Jinkun. MATLAB simulation for sliding mode control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[7] 姚琼荃,黄继起,吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆:重庆大学出版社,1997.

YAO Qionghui, HUANG Jiqi, WU Hansong. Variable structure control system [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 1997.

[8] 金鑫嘉. 车用双向 DC/DC 变换器的快速响应特性研究[D]. 上海:同济大学电子信息与工程学院,2008.

JIN Xinjia. Study on dynamic performance of bidirectional DC/DC converter in electric vehicle[D]. Shanghai: Tongji University. College of Electronic and Information Engineering, 2008.