

文章编号:1005-0523(2009)05-0054-05

# 超级电容储能装置的应用研究

曾建军

(华东交通大学 电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**针对城市轨道交通系统中的网压波动问题,提出了在牵引变电所内设置超级电容储能装置的解决方案,该装置以电容吸收为主,电阻消耗为辅,在稳定网压的同时还将制动能量存储再利用;在分析装置功能的基础上设计了主电路,并对主电路进行了建模仿真,结果表明设计能满足系统减小网压波动的要求。

**关键词:**城市轨道交通;网压波动;超级电容;储存能量

**中图分类号:**U260.359;TP23

**文献标识码:**A

## 1 研究背景

城市轨道交通的站距很短,列车起动、加速、减速及停车频繁,即列车运行过程中需要频繁起动、制动,因此带来了网压波动的问题,以广州地铁四号线为例,直流电网的额定工作电压为1 500 V,允许的电压波动范围为1 000 V~1 900 V<sup>[1,2]</sup>。当列车起动时(尤其是较多列车起动时)取流较大造成网压下降,而制动时所产生的能量往往不能完全被其它车辆或设备吸收,剩余能量回馈至电网会造成网压升高。网压的波动特别是网压的升高对电站设备和车辆的运行不利,因此如何减小城市轨道交通系统中的网压波动已成为世界轨道交通界讨论的热点问题。

目前国内外常采用在地面牵引变电所内设置再生制动能量吸收装置解决该问题,其中电阻耗能型吸收装置应用较为普遍,该装置仅将制动能量消耗,未将能量加以利用,且只解决了网压升高问题却没有考虑网压下降的问题<sup>[3,4]</sup>。若采用储能装置将制动能量储存起来,并在列车起动取流时将所储存能量释放至电网,减少直流电网电流,则网压波动问题将迎刃而解。

储能装置的储能方式有多种,如飞轮储能、蓄电池储能及超级电容器储能等<sup>[5]</sup>。本文采用超级电容器设计储能装置,超级电容是一种先进的高能量储存元件,具有容量大、体积小、寿命长、串并联组合方便等特点<sup>[6]</sup>。考虑到列车制动能量较大,而超级电容组的吸收能力有限,因此为保证网压稳定,采用以电容吸收为主,电阻消耗为辅的吸收方案。该储能装置若能成功应用到城市轨道交通中,在合理解决网压波动问题的基础上,必能创造出巨大的经济效益,因此对城市轨道交通储能装置的研究具有十分重要的现实意义。

## 2 储能装置的功能分析

储能装置设置在牵引变电所的直流侧,其主要功能是减小网压的波动,实现网压稳定,充分发挥列车的电制动功能。该装置应具备以下主要功能。

(1) 能通过直流电网对列车的运行状况进行准确、有效地检测,若在线列车已处于再生制动状况且制动能量不能完全被其它用电设备或列车吸收,立即启动装置吸收该部分能量,并能根据吸收功率的大小自动调节导通比,维持电网电压恒定在一定的范围内;

(2) 若在线列车处于起动或加速状态,并引起电网电压下降,装置立即投入工作将超级电容器组储存

收稿日期:2009-06-23

基金项目:华东交通大学校立科研基金(08DQ03)

作者简介:曾建军(1982-),男,江西新干人,助教,硕士,研究方向为交通信息工程及控制。

的能量释放至电网,减小直流电网电流,防止网压下降;

(3) 当电网无列车运行即空载时,可以有效地进行检测,装置投入工作吸收一部分电站能量以帮助列车起动;

(4) 当超级电容器组的容量不能完全吸收制动能量时,吸收电阻投入工作消耗剩余能量;

(5) 当一段时间内没有列车取流时应将所储存能量释放至放电电阻消耗,以保证装置的下一次吸收,同时进行维修时也需将所存能量消耗在放电电阻上;

(6) 具有完善的保护功能,如过压、过流、过热、短路保护等。

根据上述功能可知设计时应考虑如下关键问题:

(1) 采用何种方式快速、准确地判断在线列车的工作状况;

(2) 如何准确控制吸收装置的投入(超级电容器组的充放电);吸收能量时,如何确定其吸收功率的大小并自动调节;

(3) 如何确定超级电容及吸收电阻的参数及装置的散热问题;

(4) 在系统中如何确定滤波电路的各种参数等,以保证和线路相匹配。

### 3 装置主电路

根据装置功能要求设计主电路,如图1所示。它由电动隔离开关(QS)、滤波装置、接触器(KM<sub>1-4</sub>)、直流快速断路器、斩波器、吸收电阻(R<sub>2</sub>)、超级电容器组(C<sub>H</sub>)等构成。

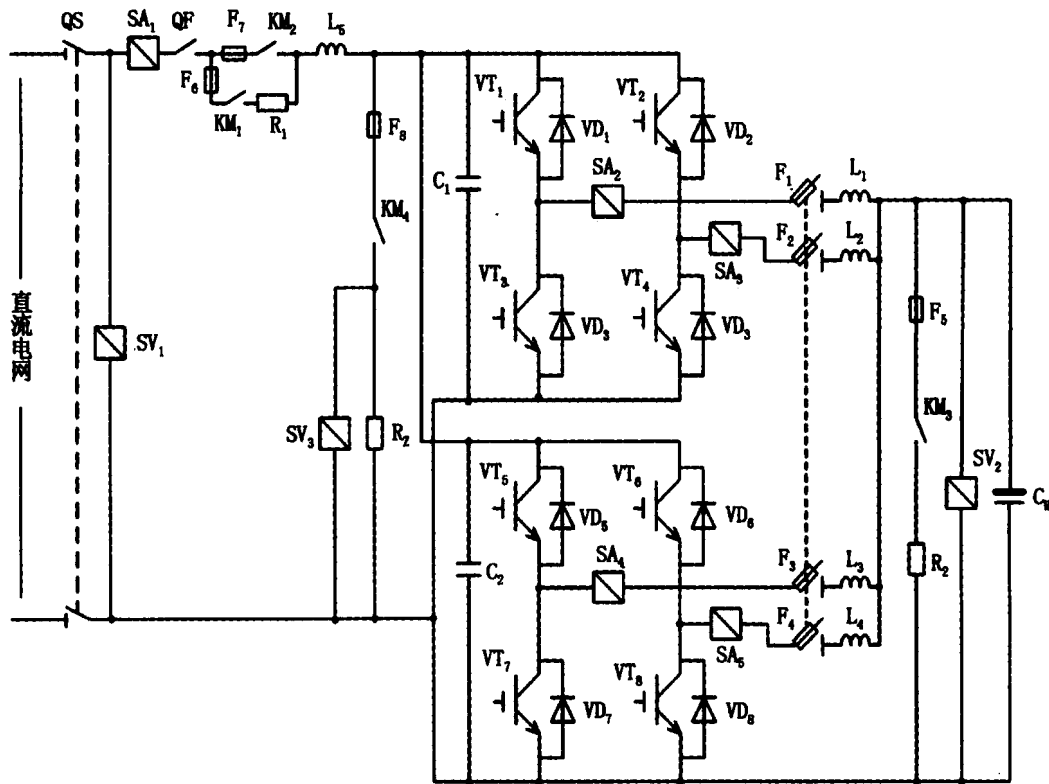


图1 装置主电路原理图

QS为电动隔离开关,维护设备时,可将系统从直流牵引网隔离开;充电时,首先合上预充电接触器KM<sub>1</sub>,给滤波装置充电,避免充电冲击电流太大损坏设备,然后合上线路接触器KM<sub>2</sub>,此时完成储能装置投入工作前的准备;电容器(C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>)为一组直流滤波电容器;L<sub>5</sub>为滤波电抗器,它有两个作用:一是当牵引网产生瞬变电压时对储能装置进行保护,二是滤除谐波电流;考虑到装置具有升压和降压双重功能,故斩波器选用非隔离式双向DC/DC变换器,共4条变流支路对能量的总量及其流向进行调节控制;F<sub>1-4</sub>为带熔

断器的手动隔离开关;  $L_{1-4}$  为平波电抗器;  $C_H$  为超级电容器组;  $R_2$  为放电电阻, 与  $F_3$  和  $KM_3$  组成放电支路, 它有两个作用: 一是进行设备维修时, 将系统从牵引网隔离出来以后, 将所储能量消耗, 二是当一段时间内没有列车取流时将所储能量消耗;  $R_2$  为吸收电阻, 与  $F_8$  和  $KM_4$  组成电阻消耗支路, 其主要作用是当电容器组容量不能完全吸收制动能量时投入工作消耗剩余能量;  $SA_{1-5}$  及  $SV_{1-3}$  分别为电流和电压传感器, 控制系统可通过它们检测所需的电流及电压信号。

#### 4 装置工作原理

超级电容储能装置主要有两个功能: 稳定网压、储存或释放能量, 即当实时检测到直流牵引网的网压波动达到设定的条件时, 装置能够快速启动, 储存或释放能量, 从而稳定网压, 满足列车起动和制动的需要。

斩波器是超级电容储能装置的重要元件, 斩波器的通断由控制系统调节, 且其导通角由电网电压的大小决定, 通过调节斩波器的导通角可实现超级电容器组的充放电, 从而实现网压稳定, 减小网压波动。当变电所附近有列车制动造成网压超过一定设定值时, 储能装置通过斩波器将制动能量吸收并储存至超级电容器组中, 从而降低网压; 而当超级电容器组的容量不足以完全吸收制动能量时, 斩波器关断并合上接触器  $KM_4$ , 即由吸收电阻  $R_2$  吸收剩余能量, 当能量被完全吸收时关断  $KM_4$ ; 当变电所附近有车辆起动并造成网压下降时, 装置通过斩波器将所储存的能量释放至电网, 实现网压稳定; 当装置进行维护或一段时间内无列车取流时装置需将所储存能量释放至放电电阻消耗; 同时为帮助列车起动, 当牵引网处于空载状态时装置投入工作并吸收一部分电网能量, 即为列车起动时向电网释放能量作准备。

电网电压变化由电压传感器  $SV_1$  检测, 牵引、制动工况的信号由变电所提供的母线电流信号(由电流传感器  $SA_1$  检测)检测, 控制系统根据各个传感器的检测信号综合判断得出电网上是否有列车处于再生制动状态, 一旦确认列车处于再生制动状态并需要吸收能量时, 装置立即投入工作, 稳定电网电压不再上升, 确保列车充分有效利用电制动; 同样, 当控制系统检测到电网上有列车处于起动并造成网压降低到设定值时, 装置投入工作向电网释放能量, 稳定网压, 帮助列车起动。

#### 5 主电路的建模仿真及分析

为验证所设计主电路的可行性, 需对主电路进行建模仿真, 由于仅验证装置的升、降压功能, 故仿真时采用电阻代替超级电容。主电路中斩波器选用非隔离式双向 DC/DC 变换器, 是超级电容储能装置实现充、放电功能的主要组成部分, 双向 DC/DC 变换器等效成一降压斩波器和一升压斩波器的组合, 故将主电路分成升、降压电路分别进行仿真。

以供电电压为 1 500 V 地铁线路为例, 利用 SIMULINK 建立主电路的仿真模型, 如图 2 所示。

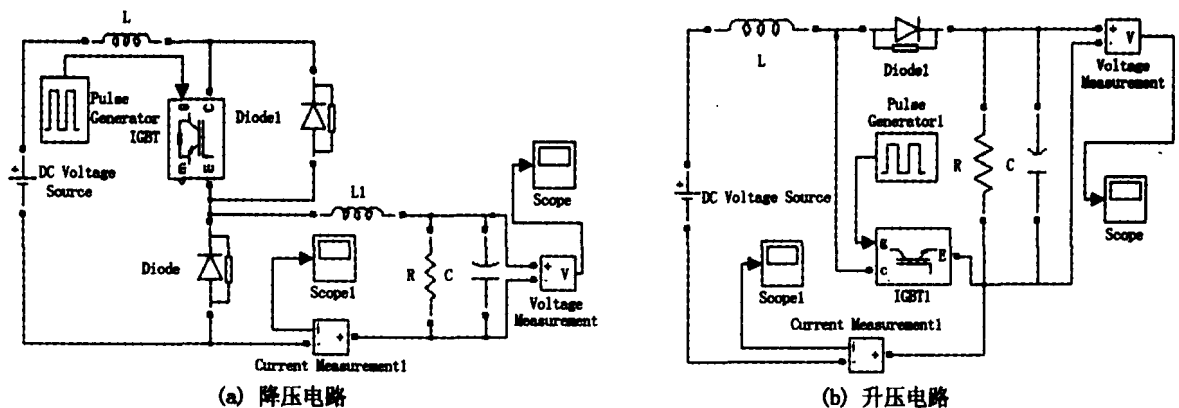


图2 主电路的仿真模型

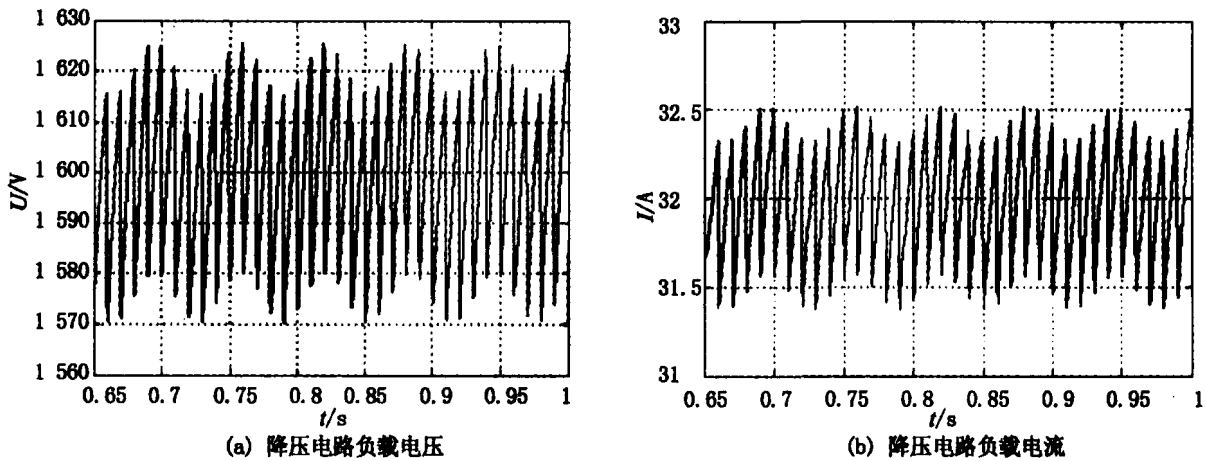


图 3 降压电路的仿真结果

图 2(a)中直流电源电压为 1 700 V,负载电阻  $R=50\ \Omega$ ,  $L=0.01\ \text{H}$ ,  $L_1=0.1\ \text{H}$ ,  $C=2.2\ \mu\text{F}$ , PWM 的占空比为 85.6%, 仿真结果如图 3。由图 3 结果可知,负载电压在 1 600 V 附近波动,负载电流在 1 A 以内波动,即当主电路中双向 DC/DC 变换器作为降压斩波器工作时,电阻吸收电流,同时改变占空比电流大小则跟着改变。实际装置中,当电网电压升高时,只需控制主电路的变换器作为降压斩波器工作,负载电流向超级电容充电,将制动能量储存,即可使网压下降,实现网压稳定功能。

图 2(b)中电源电压为 1 400 V,负载电阻  $R=100\ \Omega$ ,  $L=1\ \text{H}$ ,  $C=55\ \mu\text{F}$ , PWM 的占空比为 10.5%, 仿真结果如图 4。由图 4 可知,负载电压在 1 520 V 附近波动,负载电流在 1 A 以内波动。实际装置中,当电网电压下降时,只需控制主电路的变换器作为升压斩波器工作,超级电容向电网充电,即可使网压升高,实现稳压功能。

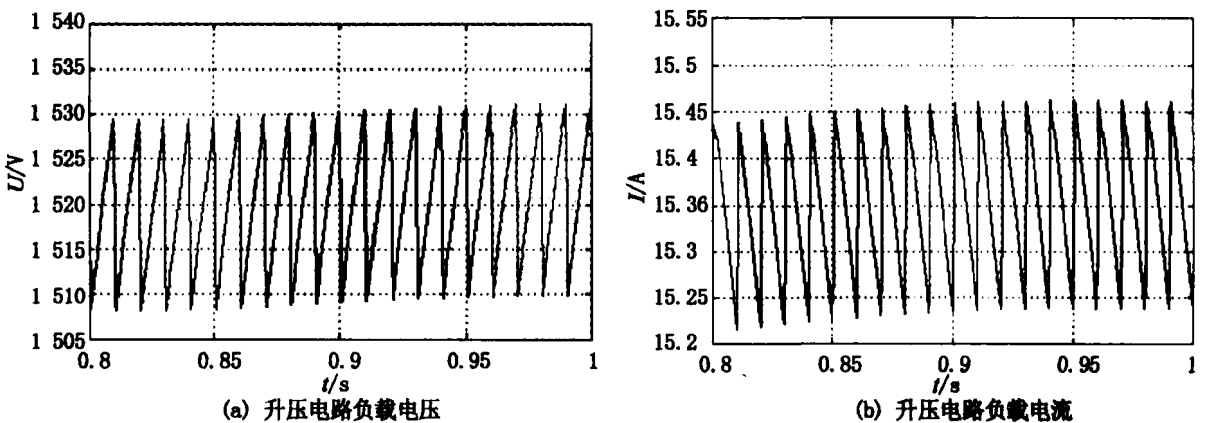


图 4 升压斩波电路的仿真结果

上述仿真结果表明,所设计主电路可以工作在升压和降压两种状态,且改变 PWM 的占空比负载电流发生改变,即可根据网压大小控制 PWM 的占空比从而改变吸收功率的大小,满足装置减小网压波动的要求,对进一步研究超级电容储能装置具有重要意义。

## 6 结论

超级电容储能装置用于城市轨道交通系统,既能稳定电网电压,又能将制动能量加以回收利用,节能效果好。随着城市经济和人口的快速增长,国内城市轨道交通的发展将更加迅猛,若能成功研制出适用于城市轨道交通的超级电容储能装置,在确保系统安全的同时,还能产生巨大的经济效益,有利于建设环保、节能的城市轨道交通系统,因此,对其做进一步研究具有十分重要的现实意义。

**参考文献:**

- [1] 张振森.城市轨道交通车辆[M].北京:中国铁道出版社,2000.
- [2] 李培曙.关于国产地铁制动几个问题的探讨[J].铁道车辆,2000,(38):69-71.
- [3] 王彦峥,苏鹏程.城市轨道交通再生能量回收技术方案的研究[J].电气化铁道,2004,(2):37-39.
- [4] 肖莹.再生制动能量消耗装置[J].轨道交通,2006,(1):46-49.
- [5] 周剑斌,苏浚,等.地铁列车运行再生能利用的研究[J].现代城市轨道交通,2006,(4):33-35.
- [6] Bobby Mahe, Terry Bollinger. Ultracapacitors provide cost and energy savings for public transportation applications[J]. Battery Power Products & Technology, 2005, 10(6): 65-68.

## A Research on the Application of Ultracapacitors Energy Storage Device

ZENG Jian-jun

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Aiming at net voltage fluctuation in the urban rail transit system, the paper presents a solution of installing the ultracapacitors energy storage device in the traction substation. In the device, capacitors are absorbed, and resistors are consumed. In the stable net pressure, braking energy will be restored and reused. Main circuit is designed and simulated based on analyzing functions of the device. The results prove that the design can meet the requirements of reducing the net voltage fluctuation.

**Key words:** urban rail transit; net voltage fluctuation; ultracapacitors; energy storage

(责任编辑:王建华)