

轨道交通

基于超级电容储能的列车制动节能技术

刘广欢¹, 刘 兰², 陈广赞³, 尹维恒³(1. 中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 天津 300250; 2. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510330;
3. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 目前国内轨道交通系统大都采用电阻耗能型、逆变回馈型等方式对列车制动能量加以消耗或利用, 但电阻耗能型造成了能量的浪费; 逆变回馈型能量必须实时回馈电网, 时间和功率的不固定性在电网负荷不大时对电网稳定性将产生一定的影响。文章通过对城轨牵引供电系统的研究、分析, 提出一种超级电容储能系统结构, 建立了超级电容储能装置的数学模型和计算条件, 形成了相对完善的多重化控制技术。该电容型再生能量吸收利用方案已成功应用于广州地铁现场, 它不仅能够将再生制动产生的能量存储起来, 也可将制动能量回馈至直流牵引网, 实现再生制动能量的充分利用。

关键词: 城轨交通; 列车制动; 储能装置; 能量吸收

中图分类号: U260.13⁺8; TM53

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)02-0047-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.02.009

Braking Energy Saving Technology of Train Based on Super Capacitor Energy Storage

LIU Guanghuan¹, LIU Lan², CHEN Guangzan³, YIN Weiheng³

(1. China Railway Electrification Survey Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300250, China;

2. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510330, China;

3. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Currently, methods such as resistor energy dissipation and inverter feedback are commonly adopted to consume or use the train braking energy in domestic rail transit system. Resistance energy consumption causes the energy waste, and inverter feedback energy must feedback to power grid in real time, in which the flexibility of time and power has a certain impact on the stability of grid when the grid load is not large. Based on the research and analysis of urban rail traction power supply system, it put forward a structure of capacitive energy absorption, established the mathematical model and calculation condition of the super capacitor energy storage device, and formed a relatively complete multi-control technology. The capacitive regenerative energy absorption and utilization scheme has been successfully applied to the Guangzhou Metro. It can not only store the energy generated by regenerative braking and, if necessary, but also feedback energy to the DC traction network, making full use of regenerative braking energy.

Keywords: urban rail transit; train brake; energy storage device; energy absorption

0 引言

城轨列车制动时, 先采用再生制动将机械能转换为电能反馈到牵引网系统, 供相邻车辆吸收利用; 当再生能量利用不完或当时没有其他车辆吸收再生制动能量时, 就需要通过列车制动能量吸收装置来吸收多余的电能^[1-4]。逆变回馈装置在实时回馈过程中, 具有稳定直

流母线电压的作用, 在直流牵引网供电区间的远端不具有独立支撑网压的作用。城轨供电系统超级电容储能系统具有功率等级高、可频繁充放电等特点, 能够有效匹配城轨车辆启停频繁的特点^[5-6]; 同时超级电容储能系统可以设置在直流牵引网供电区间的远端, 在无车、网压高时小电流充电^[7-8]。本文提出了一种新型的超级电容储能系统拓扑结构, 建立了超级电容储能装置的数学模型和计算条件, 形成了相对完善的多重化控制技术。该拓扑设计使用方便, 具有良好的兼容性, 能够同时

收稿日期: 2016-12-20

作者简介: 刘广欢(1990-), 男, 工程师, 主要从事轨道交通供电系统研究工作。

兼容 DC 1 500 V 和 DC 750 V 制式的地铁供电系统，斩波功率模块采用 DC 750 V 制式的功率模块，对于 DC 1 500 V 系统，只需要两个功率模块串联即可。目前，该方案已在广州地铁现场得到很好的验证。

1 超级电容储能系统工作原理

1.1 工作原理

当车辆制动时，车辆的再生制动能量进入直流牵引网中，引起牵引网电压升高；位于变电所的储能装置实时监测直流牵引网，当检测到直流牵引网电压升高并且达到储能装置的门槛启动电压时，直流斩波柜双向变流器导通，给超级电容器充电，将再生制动能量储存在超级电容中。当车辆启动或加速时，车辆将从直流牵引网中吸收能量，导致直流牵引网网压下降，此时列车附近的储能装置通过检测到网压的变化，控制双向变流器导通方向，超级电容器组放电，将能量从超级电容储能系统（以下简称“储能系统”）回送给牵引网，以稳定网压。这样，一方面能够将车辆再生制动能量储存再利用，以减少变电所用电量，节约电能；另一方面可以使直流牵引网压保持在规定的限度范围内，降低了车辆机械制动的频率。储能系统充放电原理如图 1 所示。

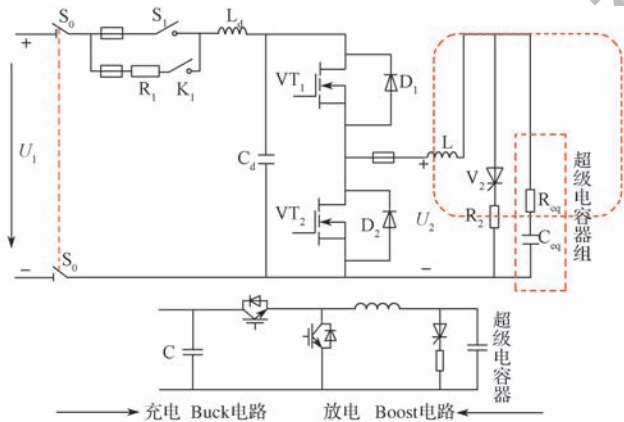


图 1 充放电原理图
Fig. 1 Schematic diagram of charge/discharge

1.2 工作模式

超级电容储能系统具有储能（储存车辆再生电能）和供能（释放再生电能回馈车辆）两种工作模式，两种工作模式可以自动切换。

1.2.1 储能模式

当车辆再生制动产生的能量不能完全被其他车辆吸收时，直流牵引网电压升高，多余的再生制动能量通过储能系统储存在超级电容器中，使网压保持在一定的范围内，避免网压过高以影响正常行车。当工作在储能模式时，储能装置的储能量在大部分时间都处在低电压可储能状态，以备随时吸收车辆的制动能量。

1.2.2 供能模式

在启动或加速过程中，车辆从直流牵引网取流导致直流牵引网电压下降，此时储能系统把储存的能量释放给车辆提供牵引用电，从而可以减少牵引变电所输出功率，减少牵引供电用电量，达到节约电能和减少能源消耗的目的；同时可以稳定直流牵引网网压，并改善牵引网的电能质量，避免网压过低造成车辆的欠压保护动作，影响正常行车。当工作在供能模式时，储能装置的储能量在大部分时间都处在高电压可释能状态，只有当检测到网压低于规定的下限时，储能装置才向牵引网释放储存的电能。

2 储能系统总体结构

储能系统总体结构主要包括双向 DC/DC 斩波器柜和超级电容器柜，由双向 DC/DC 斩波器柜直接接入直流母线正负极。双向 DC/DC 斩波器柜与直流母线相接的部分为网侧接入端，与超级电容器柜相接的部分为电容侧接入端。图 2 示出 DC 1 500 V 制式下系统主电路结构。

双向 DC/DC 斩波器柜内主要有限流电抗器、手动隔离开关及放电回路、框架保护系统、上位机控制系统、

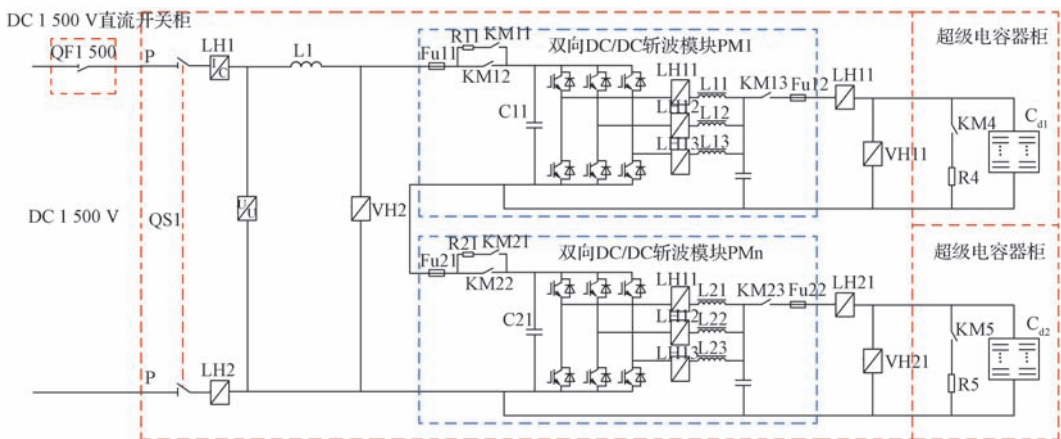


图 2 系统主电路结构图
Fig. 2 Main circuit structure of the system

双向 DC/DC 斩波模块等部件,其直流侧正极通过外部直流开关柜与变电所内的直流母线正极相接,直流侧负极通过手动隔离开关与变电所内的直流母线负极相接。限流电抗器 L1 完成滤波限流功能;手动隔离开关在系统检修时为储能部分与变电所直流母线负极提供必要的隔离;双向 DC/DC 斩波器柜 (PM1,PMn) 实现电网侧接入端电压与电容侧接入端电压的升压、降压功能,实现再生电能的双向流动,每个斩波功率模块中包括了软充电回路。双向 DC/DC 斩波器柜中功率模块是每 3 个相同功率模块首先并联,构成功率组 1 和功率组 2,然后两组功率模块组通过串联形成直流 1 500 V 的输出。

超级电容器柜分为两组,每组均通过串并联形式连接,内部包括手动放电支路,包含自带能量管理系统和故障监控系统的超级电容阵列。超级电容组 C_{d1} , C_{d2} 作为储能介质,实现再生电能的存储或释放。在主电路输出端,每个模块组对应一组超级电容器,电容端电压输出为 DC 200 V~DC 550 V。

3 储能系统主电路的设计

在城市轨道交通牵引供电系统中,储能系统一般工作在 3 种工况,即:牵引供电网通过直流变换器向电容器充电状态、电容器经过直流-直流变换器向牵引供电网放电状态以及装置不工作状态。

储能系统由断路器、隔离开关、预充电电阻、滤波器、双向 DC/DC 斩波器、电抗器、放电电阻与晶闸管、电容器组和相应的控制电路组成(图 1)。当牵引网电压升高至所设定的电压上限值时,直流断路器和接触器 K_1 闭合,对中间稳压电容 C_d 进行预充电,由滤波电感 L 将直流牵引网中产生的谐波滤除。

3.1 主电路工作状态分析

(1) 电能存储的工作状态。当牵引网电压升高至设定电压上限值时,控制装置控制直流-直流变换电路周期性导通与截止,此时 VT_1 和二极管 D_2 工作。当 VT_1 导通时,牵引网直接向电感及电容器组进行充电,部分电能储存在电感中;当 VT_1 关断时,电感放电,其电流 i_L 通过二极管 D_2 的续流,将电感中储存的电能续存到电容器组中,实现电容器组持续充电。

(2) 电能释放的工作状态。当牵引网电压下降至设定电压下限值时, VT_2 和二极管 D_1 处于工作状态。当 VT_2 导通时,超级电容器组放电,将电能储存到电感中;当 VT_2 关断时,超级电容器组及电感同时作为电源向牵引电网释放电能。

(3) 装置不工作状态。当需要装置退出进行检修时,

可通过 V_2 来释放超级电容器内的残余电压,此时 VT_1 及 VT_2 均关断、 V_2 导通,超级电容器组放电,将残余的电能消耗在电阻 R_2 上。

储能系统对电能的吸收和释放是一个暂态过程,而在牵引供电系统中进行潮流计算时,一般进行稳态计算,但在本文研究包括储能系统在内的牵引供电系统时,由于控制装置控制直流-直流变换电路采用周期性导通与截止方式,导通、截止持续时间很短,故可将电路以离散逐点的形式等效为一个稳态电路,用稳态方程进行过程计算,得到各时刻电容吸收装置及牵引系统相关电气参数。

3.2 数学模型及计算

3.2.1 吸收电能

在储能系统吸收电能时,电功率是从牵引网流向电容器组。此时列车将再生制动电能输送到牵引网,然后将再生制动的电能等效为一个随再生制动能量变化而变化的功率源给储能系统充电。计算中,需要将直流-直流变换器的输入侧电阻值(包括牵引网电阻、回流钢轨电阻和回流电缆电阻)归算到直流-直流变换器的输出侧,即电容器组侧,从而与电容器组形成充电回路,其等效电路如图 3 所示。其中, D 为吸收电能时直流-直流变换电路的导通比, U_q 为牵引网电压($U_q > U_{set1}$),直流牵引网充电门槛电压为 U_{set1} , R_q 为降压变换电路一次侧的等效归算电阻, R_{eq} 和 C_{eq} 分别为电容器组的等效电阻和电容, U_c 为电容器组电压。

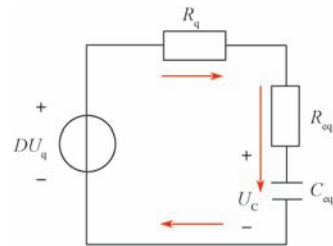


图 3 系统吸收电能时的等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of the system when it absorbs electrical energy

在电容器组充电的过程中,由于直流-直流变换电路的作用,当其频率远大于电容器组的充电常数时,储能系统进行恒流充放电,其电流特性曲线是一条与时间轴平行的直线,电容器组充电时的电压特性曲线也可以等效为一条直线。在整个电容器组的充电过程中,直流-直流变换电路根据牵引网电压和超级电容充电前的电压大小,实时调整直流-直流变换器的导通比 D 的大小,从而将超级电容侧充电电流维持为一个恒定值,使得电容器组的电压外特性为一条直线。对于再生制动电能传输的电气参数,可以通过直流潮流计算获得。

与再生制动电能吸收的相关计算如下:

$$DU_q = I_{C1}(R_{eq} + D'^2 R_q) + U_0 \quad (1)$$

式中: I_{C1} ——电容器组的充电电流; U_0 ——电容器组充电前的电压。

利用式(1)可求得吸收电能时直流-直流变换电路的导通比 D , 则在电容器组充电时, 牵引网的等效电流为

$$I_{ch} = DI_{C1} \quad (2)$$

电容器组的充电电压方程为

$$u_{C1}(t) = \frac{I_{C1}}{C_{eq}} t + U_0 \quad (3)$$

电容器组所储存的电能为

$$W = \frac{I_{C1}^2 t^2}{2C_{eq}} + I_{C1} U_0 t \quad (4)$$

3.2.2 释放电能

在储能系统释放电能时, 电功率从电容器组流向牵引网。在电容器组的放电过程中, 当直流-直流变换电路的开关频率远大于电容器组的充电常数时, 则在放电的时间内, 电容器组以直流-直流变换电路的开关周期为周期进行周期性放电。在整个电容器组放电过程中, 可以将以电容器组为电源的放电电路等效为一个电流源向牵引网提供电能。在放电过程的计算中, 也需要将直流-直流变换器输入侧的电阻(包括牵引网电阻、回流钢轨电阻和回流电缆电阻)归算到电容器组侧, 从而与电容器组形成闭合的放电回路, 其等效电路如图4所示, 其中 D' 为释放电能时直流-直流变换电路的导通比。

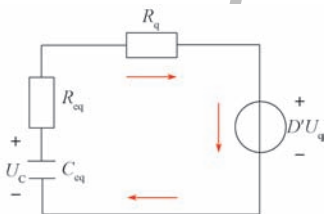


图4 系统释放电能时的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of the system when it releases electrical energy

在整个电容器组的放电过程中, 根据牵引网电压和超级电容充电电压的大小, 通过直流-直流变换电路动态地调整 D' 的大小, 当进行恒流充电时, 超级电容侧的放电电流为一个恒定值。有关电容器组电能释放的计算如下:

假设牵引网的采样电压 $U_q < U_{set2}$ (U_{set2} 为直流牵引网放电门槛电压), 并设定电容器组的放电电流为 I_{C2} , 则

$$U_0 = I_{C2} \left(R_{cq} + \frac{R_q}{D'^2} \right) + D' U_q \quad (5)$$

利用式(5)可求得直流-直流变换电路的导通比 D' , 由此可以得到在电容器组放电时, 牵引网的等效电流 I_{disch} 为

$$I_{disch} = \frac{I_{C2}}{D'} \quad (6)$$

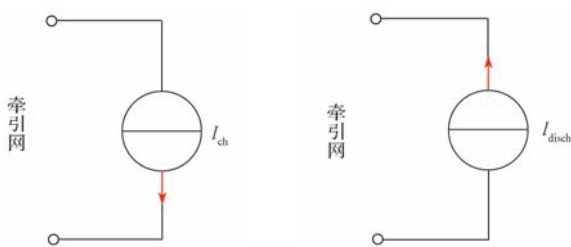
电容器组的放电电压方程为

$$u_{C2}(t) = -\frac{I_{C2}}{C_{eq}} t + U_0 \quad (7)$$

电容器组所储存的电能为

$$W = \frac{I_{C2}^2 t^2}{2C_{eq}} + I_{C2} U_0 t \quad (8)$$

综上所述, 在恒流充放电模式下, 除电容器组以外的再生制动电能吸收装置不论是从牵引网吸收电能, 还是向牵引网释放电能时, 都可以等效为一个电流源, 其等效电路如图5所示。在吸收及释放电能时, 通过简化电容器组再生电能吸收装置的外特性, 计算出电容器组的电压, 从而计算出电容器组所吸收与释放的电能, 然后进行牵引供电系统潮流计算, 通过潮流计算得到牵引变电所与牵引网电压水平。



(a) 充电时的等效电路 (b) 放电时的等效电路

图5 装置充、放电时的等效电路
Fig. 5 Equivalent circuit of the system when it charges or discharges

4 储能系统接入方案

针对城轨交通供电系统, 典型的牵引变电所超级电容储能系统接入方案, 可通过在变电所内 DC 1 500 V 直流侧开关柜系统中新增一路馈线, 即通过 DC 1 500 V 开关柜连接储能系统的直流侧, 其主要接线图如图6所示, 其中红色虚线框内部分为储能系统及配套开关柜。由图6可以看出, 储能系统只需要与直流 1 500 V 母线正负极相连, 储能系统与交流电网完全独立。这样, 一方面不会影响到交流电网电能质量, 另一方面即使超级电容储能装置出现故障, 也不会影响既有的直流牵引供电系统。

(下转第71页)