

# 再生制动能量电容储能装置组网及协同控制系统

桑佳楠 丁明进 刘春松

(国电南京自动化股份有限公司, 210043, 南京//第一作者, 工程师)

**摘要** 介绍了一种电容储能装置组网及协同控制系统。指出了组网设计原理及协同控制策略, 可运用于城市轨道交通再生制动能量电容储能装置。其由电容储能装置控制系统、综合保护装置、环网交换机、站间光纤组成环网。试验证明: 通过协同控制可提高整条线路的再生制动能量吸收效率, 稳定牵引网压, 确保列车制动安全。

**关键词** 城市轨道交通; 再生制动; 电容储能; 协同控制

**中图分类号** U260.359

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.037

## Networking and Synergetic Control System for Regenerative Braking Energy Capacitor Energy Storage Device

SANG Jia'nan, DING Mingjin, LIU Chunsong

**Abstract** A networking and synergetic control system of capacitor energy storage device is introduced. The design principle of network and synergetic control strategy are pointed out, which can be applied to regenerative braking energy capacitor energy storage device of urban rail transit. The loop network is composed of the control system of capacitor energy storage device, comprehensive protection device, loop network switch and inter-station optical fiber. The experiment proves that the energy absorption efficiency of regenerative braking is improved, and the traction net pressure is stabilized through synergetic control, ensuring train braking safety.

**Key words** urban rail transit; regenerative braking; capacitor energy storage; synergetic control

**Author's address** Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., 210043, Nanjing, China

城市轨道交通列车在运行过程中由于本身质量较大、行驶速度较快, 频繁地制动会产生大量的再生制动能量。这部分再生制动能量如不被吸收利用, 将引发直流接触网电压急速抬高, 威胁城市轨道交通运行安全<sup>[1]</sup>。再生制动能量电容储能装置(以下简称“电容储能装置”)通过变流器以斩波的方式将直流电压升高或者降低至可控范围, 存储

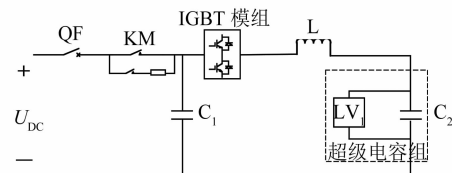
在超级电容中, 以实现在列车制动时吸收多余的再生制动能量, 从而避免直流接触网电压升高<sup>[2]</sup>; 在列车启动时释放再生制动能量可为列车供电。在城市轨道交通实际运行线路中, 由于再生制动能量受车辆运行速度、载客量及排车密度等参数影响, 不同的牵引所能吸收的再生制动能量并不相同, 但在实际工程设计中大多配置相同容量的电容储能装置, 因此出现了不同牵引所的装置功率输出不平衡、不协调的情况, 即有的装置容量不足以吸收再生制动能量, 有的装置仍有剩余容量, 对于整条线路的再生制动能量吸收率不高<sup>[3]</sup>。另一方面, 如果某站再生制动能量吸收装置故障或检修, 该站的牵引网压将难以被稳定住, 会威胁列车行驶安全。

为解决上述问题, 可将整条线路的电容储能装置进行组网, 当某牵引所电容储能装置因故障、检修而退出运行, 或者再生制动能量过大而吸收功率不足时, 相邻站装置可以进行功率支援, 能最大限度稳定直流网压, 以确保列车运行安全。

## 1 电容储能装置组网及协同控制方案

### 1.1 电容储能装置运行原理

电容储能装置的直流侧直接并联接入供电系统的直流牵引网, 其电气主接线如图1所示。



注: QF 为断路器; KM 为预充电装置; IGBT 为绝缘栅双极型晶体管;  $U_{dc}$  为直流牵引网电压; L 为直流电抗器;  $C_1$  为支撑电容;  $C_2$  为电容组;  $LV_1$  为电压霍尔传感器。

图1 电容储能装置电气主接线图

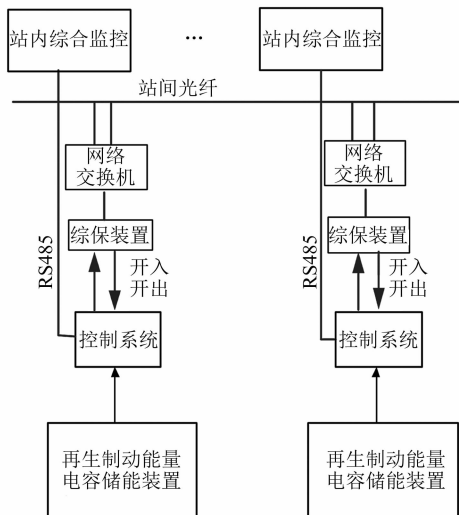
Fig. 1 Main wiring diagram of capacitor energy storage device

电容储能装置通过 IGBT 模组以斩波的方式将直流电压升高或者降低至可控范围内, 进而存储在

超级电容组中,以实现在列车制动时对多余再生制动能量的吸收,并在列车牵引时供电稳定直流网压。

## 1.2 电容储能装置的组网设计

城市轨道交通牵引供电系统,在牵引降压所或降压所中配置电容储能装置,由电容储能装置控制系统、综合保护装置(以下简称“综保装置”)、环网交换机和站间光纤组成环网或者链式网络。多套电容储能装置组网后工作原理如图2所示。



注: RS485 为通信方式。

图2 电容储能器装置组网后工作原理图

Fig. 2 Working principal diagram of the capacitor energy storage device after networking

### 1.3 协调系统的控制策略

电容储能装置组网后的协同控制逻辑如图 3 所示。协同控制包含以下步骤。

步骤1:判断第  $K$  个牵引所内电容储能装置是否发出协同控制请求,所述的发出协同控制指令具有两个并行触发条件:①第  $K$  个牵引所内电容储能装置的电容电压  $U$  达到最大值  $U_{\max}$ ,且直流牵引网压  $U_{\text{DC}}$  继续上升;②第  $K$  个牵引所内电容储能装置因故障、检修而退出运行。

任一触发条件满足后,第  $K$  个牵引所内电容储能装置的控制系統发出信号,请求相邻的第  $K+1$  和  $K-1$  牵引所的设备进行功率支援。

步骤2:第  $K+1$  和  $K-1$  牵引所的设备判断当前电容储能状态。当检测到电容电压  $U \leq U_0$ , 则进行步骤3;若电容电压  $U > U_0$ , 则进入步骤四, 请求相邻的第  $K+2$  和第  $K-2$  牵引所设备进行协同控制。其中,  $U_0$  为低于电容电压吸收上限值  $U_{\max}$  的电压比较值。

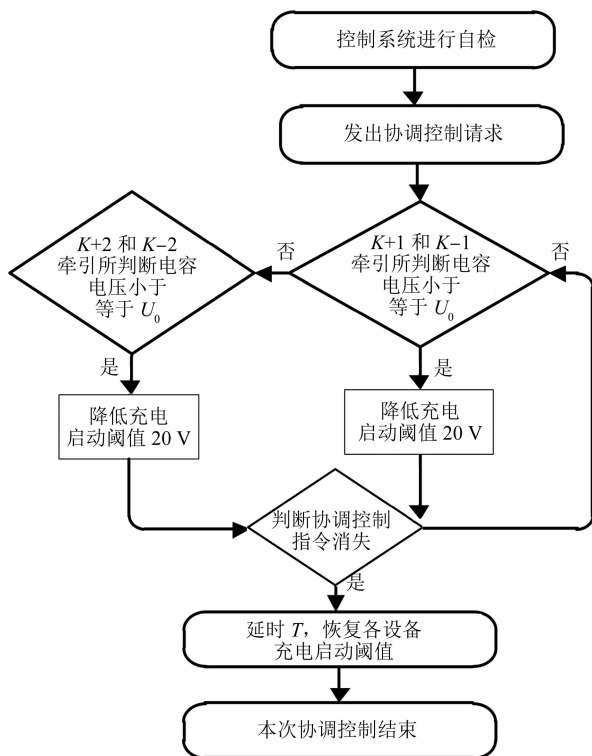


图 3 协同控制策略

Fig. 3 Synergetic control strategy

步骤3:相关设备的控制系统控制充电启动阈值  $U_{in}$  降低 20 V(重复过程最多降低 2~3 次),延迟  $T$  进入步骤5。其中,  $U_{in}$  为电容储能装置对于直流接触网电压抬高的启动阈值。

步骤4:判断第  $K+2$  和第  $K-2$  牵引所设备的电容储能状态,若电容电压  $U \leq U_0$ ,则进入步骤3;若电容电压  $U > U_0$ ,则进入步骤2。

协同控制请求最多发送到第  $K+2$  和第  $K-2$  的牵引所设备,因为牵引接触网及回流轨本身的阻抗特性,距离越远电压损耗越高,相邻站电容储能装置对于再生制动能量的吸收效果也就越差。

步骤5:判断第  $K$  个牵引所内电容储能装置发出的协同控制指令是否消失,若消失,恢复各设备被降低了的充电启动阈值,退出本次协同控制;若没有消失,进入步骤2重新判断。

上述协调配合方式为典型方案,可根据实际测试情况和数据进行进一步优化设备启动阈值、延时时间、电容电压上限值与下限值等。

## 2 组网及协同控制系统的应用

## 2.1 项目设计

电容储能装置安装在某城市轨道交通试验线,

列车最高速度为 80 km/h,采用 6 编组单轨制式。牵引供电制式采用 DC 750 V 接触轨供电,接触轨回流方式。

对电容储能装置应符合以下设计要求:额定功率为 1 000 kW 间歇工作制(30 s/120 s),启动阈值  $U_{in}$  为 860 V,电容电压上限值  $U_{max}$  为 750 V,电压比较值  $U_0$  为 600 V。

### 2.2 测试及分析

结合现场车辆 AW3(超常荷载)工况试验,对线路中电容储能装置的工作状态进行了在线测试和分析。第 1 个牵引所内电容储能装置发出协同控制请求,其信号通过网络交换机传输到相邻牵引所,控制系统数据解码后得到由低电平变为高电平的信号。协同控制请求信号如图 4 所示。

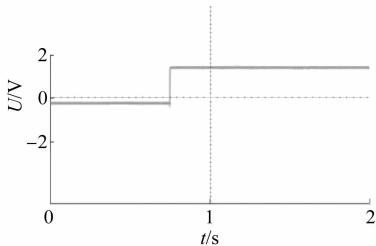


图 4 协同控制请求信号示意图

Fig. 4 Synergetic control request signal

综保装置之间采用 Goose 通讯协议<sup>[4]</sup>,各控制系统间为对等控制,无需配置中央处理器,因此仅需进行开关量的传输,大大提高了协同控制的响应速度。

#### 2.2.1 第 2 个牵引站运行工况

第 2 个牵引所内电容储能装置收到协同控制请求后,根据 2.3 节所述的步骤二控制策略,判断当前电容储能状态,检测到电容电压  $U \leq 600$  V 时,则进入步骤三,其控制系统控制充电启动阈值  $U_{in}$  降低 20 V,为 840 V。第 2 个牵引所内电容储能装置运行波形如图 5 所示(其中,  $I$  为电容储能装置的吸收电流)。

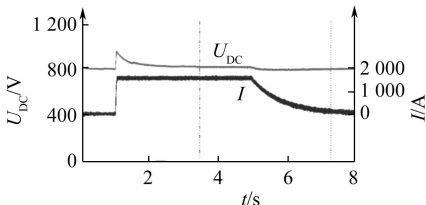


图 5 第 2 站电容储能装置波形示意图

Fig. 5 Waveform diagram of capacitor energy storage device in the 2nd station

列车在第 1 个牵引所制动后,由于该站电容储能装置故障不能吸收再生制动能量,因此再生制动能量引起第 2 站的牵引网压继续升高,当达到启动阈值 840 V 时,该站的电容储能装置开始吸收制动能量,73 ms 后达到最大输出电流 1 470 A。牵引网电压被控制在目标值后,设备的输出电流随着制动功率的减小趋近于 0。

电容储能装置额定运行后,直流牵引网压的相关参数测量如表 1 所示。

表 1 直流网压的纹波因数

Tab. 1 Ripple factors of DC network voltage

工况	电压最大值/ V	电压最小值/ V	电压有效值/ V	纹波因数/ %
满载	833.2	805.8	819.5	1.6

电容储能装置设置的控制目标值为 820 V,设备运行后,直流网压有效值实测 819.5 V。经计算纹波因数为 1.6%,满足 GB/T 36287—2018 要求的 3%<sup>[5]</sup>。可见设备可以有效稳定直流牵引网压,抑制网压波动。

#### 2.2.2 第 3 个牵引站运行工况

为了使第 3 个牵引所内电容储能装置能够进行功率支援,模拟第 2 个牵引所内电容储能装置不具备协同吸收的条件,则控制系统进入 2.3 节所述步骤四,判断第 3 个牵引所设备的电容储能状态。检测到该站电容电压  $U \leq 600$  V,控制系统控制充电启动阈值  $U_{in}$  降低 40 V,为 820 V。第 3 个牵引所内电容储能装置运行波形如图 6 所示。

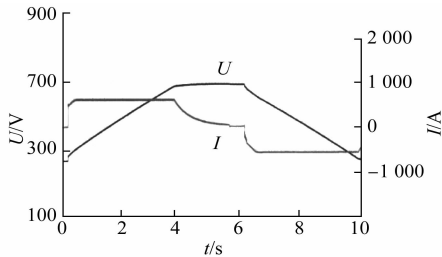


图 6 第 3 站电容储能装置波形示意图

Fig. 6 Waveform diagram of capacitor energy storage device in the 3rd station

第 3 牵引站的电容储能装置最大吸收电流为 530 A,最大电量为 0.59 kWh,电容电压充至 700 V 后开始放电稳定直流牵引网压。可见,该站电容储能装置成功投入运行,吸收了来自第 1 牵引站的制动能量,但由于距离较远、线路损耗高,因此吸收的再生制动能量相比第 2 个牵引站少。

### 3 结语

安装组网及协同控制系统后,当某站的电容储能装置控制系统发出协同控制请求时,站间联络光纤会将信息传输给相邻站的电容储能装置,装置将依次降低启动阈值,最大限度稳定直流牵引网压,有效提高了全线再生制动能量的吸收效率,以保障行车安全。试验证明系统协调性好、响应速度快,具有显著的推广价值。

### 参考文献

- [1] 桑佳楠,王结飞,刘春松,等. 混合型吸收装置在跨坐式单轨交通的应用研究[J]. 电力电子技术,2021(1):68.  
SANG Jia'nan, Wang Jiefei, LIU Chunsong, et al. Application and research on hybrid absorption device in straddle monorail [J]. Power Electronics, 2021(1):68.
- [2] 张秋瑞,毕大强,葛宝明. 地铁再生制动能量逆变回馈电网装置的研究[J]. 电力电子技术,2012(9):61.  
ZHANG Qiurui, BI Daqiang, GE Baoming. Application of regenerative braking energy injected-grid device for subway

power[J]. Power Electronics, 2012(9):61.

- [3] 李锦,胡磊磊,陈蕾,等. 一种地铁再生制动能量逆变吸收装置协调控制方法及系统: CN201810728655. 9[P]. 2018-11-30.  
LI Jin, HU Leilei, CHEN Lei, et al. Coordination control method and system for subway regenerative braking energy inversion absorption device: CN201810728655. 9[P]. 2018-11-30.
- [4] 王凯建,隋佳斌,陈海辉. 基于 GOOSE 通信的智能保护装置在青岛地铁中压供电网络的应用[J]. 都市快轨交通, 2019(2):109.  
WANG Kaijian, SUI Jiabin, CHEN Haihui. Application of intelligent relay protection device based on GOOSE communications in Qingdao Metro Line 11 [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019(2):109.
- [5] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通 列车再生制动能量地面利用系统: GB/T 36287—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 13.  
State Administration of Market Supervision, Standardization administration. Urban rail transit-ground systems for vehicle braking regenerative energy utilization: GB/T 36287—2018 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2018: 13.

(收稿日期:2021-07-16)

### (上接第 186 页)

- [3] 沈张勇. 机械法联络通道结构设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6):58.  
SHEN Zhangyong. Study on structural design of mechanical method liaison tunnel[J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(6):58.
- [4] 孙龙飞,陈振雷,李坚成. 盾构法开挖地铁联络通道对地表沉降的影响研究[J]. 岩土工程技术, 2019(4):197.  
SUN Longfei, CHEN Zhenlei, LI Jiancheng. Effects of surface subsidence in excavation of metro crossing passage tunnel by shield machine [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2019(4):197.
- [5] 朱瑶宏,高一民,董子博,等. 盾构法 T 接隧道结构受力现场试验研究——以宁波轨道交通 3 号线联络通道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019(11):1759.  
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Field test on structural mechanism of T-connected shield tunnel: a case study of connecting passage on Ningbo Metro Line No.3 [J]. Tunnel Construction, 2019(11):1759.
- [6] 丁修恒. 地铁区间联络通道盾构法修建关键技术[J]. 建筑施工, 2019(4):667.  
DING Xiuheng. Key techniques for shield construction of metro contact channel [J]. Building Construction, 2019(4):667.
- [7] 柳献,高一民,张姣龙,等. 机械法联络通道施工中主隧道的破

洞响应分析[J]. 岩土工程学报, 2020(5):951.

- LIU Xian, GAO Yimin, ZHANG Jiaolong, et al. Structural response of main tunnel linings during construction of connecting aisle by means of mechanized drilling [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020(5):951.
- [8] 胡心舟. 不均匀变形对联络通道喇叭口应力的数值分析[J]. 四川建材, 2020(2):92.  
HU Xinzhou. Numerical analysis on the stress of the cross passage bell-mouth by uneven deformation [J]. Sichuan Building Materials, 2020(2):92.
- [9] 邓稀,周亭秀. 山岭隧道主洞与联络道交叉段稳定性分析[J]. 四川建材, 2017(4):70.  
DENG Xi, ZHOU Tingxiu. The stability analysis of the intersection between maintain tunnel and its connected passage-way [J]. Sichuan Building Materials, 2017(4):70.
- [10] SPYRIDIS P, BERGMEISTER K. Analysis of lateral openings in tunnel linings [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50:376.
- [11] 吕虎. 隧道联络通道施工力学行为研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
LYU Hu. Study on construction mechanics for cross passage of tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

(收稿日期:2021-10-18)