

超级电容储能型现代有轨电车供电系统设计要点分析*

胡 斌

(中国铁路设计集团有限公司, 300142, 天津//工程师)

摘 要 从主要影响因素、外部电源、牵引负荷特性、主接线形式、运行方式等方面,对超级电容储能型现代有轨电车供电系统的设计要点进行了分析,得出了与超级电容储能型现代有轨电车匹配性良好的无网供电系统设计方案。

关键词 现代有轨电车;超级电容;无网供电系统;设计要点
中图分类号 TM910.2;U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.028

Analysis of the Design Essentials in Modern Tram Power Supply System with Super Capacitor

HU Bin

Abstract Power supply system design is an important part of modern tram engineering. In this paper, the main design essentials in modern tram power supply system are deeply analyzed from aspects of the main factors, external power supply, traction load characteristics, main connection form and operation mode, a good power supply system design that matches modern super capacitor storage tram is presented.

Key words modern tram; super capacitor; no contact line power supply system; design essential

Author's address China Railway Design Corporation, 300142, Tianjin, China

1 现代有轨电车供电技术概述

现代有轨电车供电制式可分为传统架空接触网供电方式和新型无网供电方式两种。架空接触网供电方式具有技术成熟、造价低廉、应用广泛等优势,但其景观效果差,对净空要求高,在城市中心设置很不美观。新型无网供电方式不再在车辆上方架设接触网,从而避免了上述缺点,是未来有轨电车供电制式的发展趋势。无网供电系统按照车

辆授流方式的不同又可分为地面供电方式和储能元件供电方式。

常见的地面供电方式分为地面嵌入式接触轨供电(APS)、电磁吸附式地面牵引供电(Tramwave)和电磁感应式牵引供电(Primove)^[1-3]。这3种地面供电方式均为国外厂商专有技术,技术引进可能性小,且全套设备采购成本高,后期运营维护受供货商制约,工程应用可靠性较低,造价高昂。以我国现在的技术水平和实际情况,地面牵引供电方式目前尚不具备在有轨电车领域大面积推广的条件。

储能元件供电方式根据储能元件的不同,大致可分为蓄电池供电方式、超级电容供电方式和飞轮储能供电方式3种。其中,现代有轨电车的运行特点与超级电容特性具有良好的匹配性。

超级电容是新型储能元器件的代表,目前在工业生产多个领域均有应用。超级电容具有很多优点^[4-5],如充放电速度快、循环寿命长、充放电电流大、能量转换效率高、内阻小、功率密度高,以及充放电过程无化学反应、无污染等。本文从主要影响因素、外部电源、牵引负荷特性、主接线形式及运行方式等方面,对超级电容储能型现代有轨电车供电系统的设计要点进行深入分析。

2 供电系统设计要点分析

现代有轨电车供电系统设计是整个有轨电车设计的重要环节,由于车辆受电方式的变化,其供电系统的设计与传统接触网方式有较大区别。

2.1 主要影响因素

不同于传统城市轨道交通(以下简为“城轨”)车辆(动态负荷),超级电容储能型现代有轨电车是在各个车站内,通过整流机组及充电装置变换出车

* 中国铁路设计集团有限公司重点科研课题(721535)

辆需要的电压、电流,并在短时间内(通常利用车辆停站时间,不超过 30 s)向储能元件充电,获取下一区间车辆运行所需的电能。所以,此种车辆受流形式为静态负荷。图 1 为两种牵引供电制式的对比示意图。

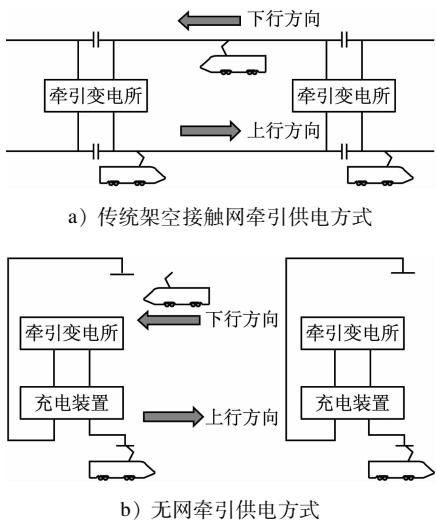


图 1 传统架空接触网与无网牵引供电制式对比示意图

从图 1 建立的模型分析可知,对于传统的城轨供电系统设计,主要的设计影响因素为牵引负荷计算、牵引网电压水平计算及走行轨对地电位计算等。而完成上述计算,应具备以下基本计算条件^[6-7]:

- (1)线路资料:线路长度、坡度、车站数量、站间距等;
- (2)行车资料:运行交路、车辆编组、高峰小时发车对数、发车时间、停站时间等;
- (3)列车资料:列车电流曲线、列车速度曲线和列车时间曲线等;
- (4)牵引网资料:接触网和走行轨的单位阻抗等;
- (5)电压参数:牵引变电所空载电压、牵引网额定电压等。

对于超级电容储能型现代有轨电车无网供电系统设计,除上述影响因素外,还应完成超级电容充放电功率计算、储能量计算以及车辆续航里程计算等。这些计算除需上述计算条件外,还应具备:

- (1)超级电容参数:单体容量、电压、电流、模组串并联数等;
- (2)平交路口资料:车辆路权方式,全线平交路口数量、位置,交通组织方式等;

(3)充电装置资料:设备额定功率、电压电流等级、运行方式等。

2.2 外部电源选择

目前,我国城市电网对轨道交通的供电方式一般可归纳为主变电所集中供电和开闭所相对分散供电两种。

主变电所集中供电方式的主要优点在于调度管理方便、易实现轨道交通的资源共享。但电源点难以引入、运维成本高、工程实施难度大、工程投资巨大是其不可避免的缺点。

现代有轨电车属中低运量轨道交通形式,通常定位于大型城市轨道交通的补充、延伸或中小城市轨道交通的骨干。所以,现代有轨电车的线网规划规模通常不大,且线路选址常位于大型城市的片区内或中小城市的市中心,不需要大量的主变电所资源共享,调度管理亦不复杂。此外,文献[7]指出,现代有轨电车供电系统负荷等级基于制式特点、车辆特点和运营特点,选择二级负荷更为合适,一旦发生现代有轨电车停运的情况,可通过租用社会公共交通资源对现代有轨电车客流进行应急性支援,弱化对城市公共交通的冲击。综上所述,现代有轨电车供电系统外部电源宜采用开闭所相对分散供电方式。

目前,城市配电网的主流电压等级为 10 kV,单回路馈线间隔容量为 8 000 ~ 10 000 kVA。超级电容储能型现代有轨电车无网供电系统牵引负荷性质特殊,供电系统的设计需根据负荷特性对系统中外部电源容量校核。

2.3 牵引负荷特性分析

超级电容模组的功率密度大,充电时间短(≤ 30 s),故牵引负荷总体呈脉冲状,充电功率根据列车编组数量的不同而变化。常见的车载超级电容主要参数如表 1 所示。

表 1 车载超级电容主要参数表	
参数	参数值
车辆编组/辆	4
额定电压/V	900
工作电压范围/V	500 ~ 900
额定电流/A	1 800
额定容量/F	120
充电功率/kW	900 ~ 1 620

超级电容储能型现代有轨电车牵引负荷特性如图 2 所示。

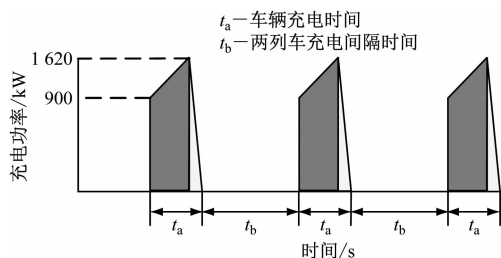
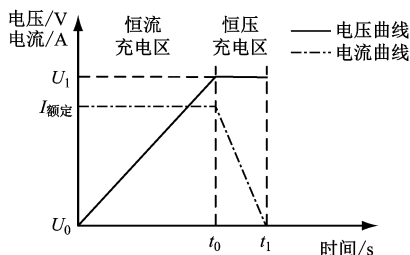


图2 牵引负荷特性示意图

超级电容充电通常采用恒流充电及恒压充电，或者两种方式的结合。超级电容电压、电流随时间的变化曲线如图3所示^[8]。



注： t_0 为恒流充电区时间； t_1 为恒压充电区时间； U_0 为超级电容起始充电电压； U_1 为超级电容终止充电电压； $I_{\text{额定}}$ 为超级电容额定充电电流

图3 超级电容充电特性曲线图

结合图2和图3，可得到单个充电装置充电功率的均方根值：

$$P_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\int P^2 dt}{t}} = \sqrt{\frac{\int P_0^2 dt_0 + \int P_1^2 d(t_1 - t_0)}{t_a + t_b}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{U_0 + U_1}{2} I_{\text{额定}}\right)^2 t_0 + \left(U_1 \frac{I_{\text{额定}}}{2}\right)^2 (t_1 - t_0)}{t_a + t_b}} \quad (1)$$

式中：

P_{RMS} ——单个充电装置充电功率的均方根值；

P_0 ——恒流充电区平均功率；

P_1 ——恒压充电区平均功率。

设供电臂内同时运营的车辆有 m 辆，则总的牵引负荷可表示为：

$$P_{\text{Tac}} = k_0 m P_{\text{RMS}} \quad (2)$$

式中：

P_{Tac} ——供电臂内总的牵引功率；

k_0 ——车辆同时充电系数，根据具体线路的条件、运营组织方案等因素确定。

2.4 主接线形式的选择

目前，国内常见的超级电容储能型无网供电系统主接线形式主要分为单机组一对一型、单机组一

对多型和双机组一对多型3种。图4给出了3种无网供电方案的主接线示意图。3种接线形式在供电可靠性、工程可实施性、工程投资、运营维护、回流系统等方面各有优缺点，如表2所示。

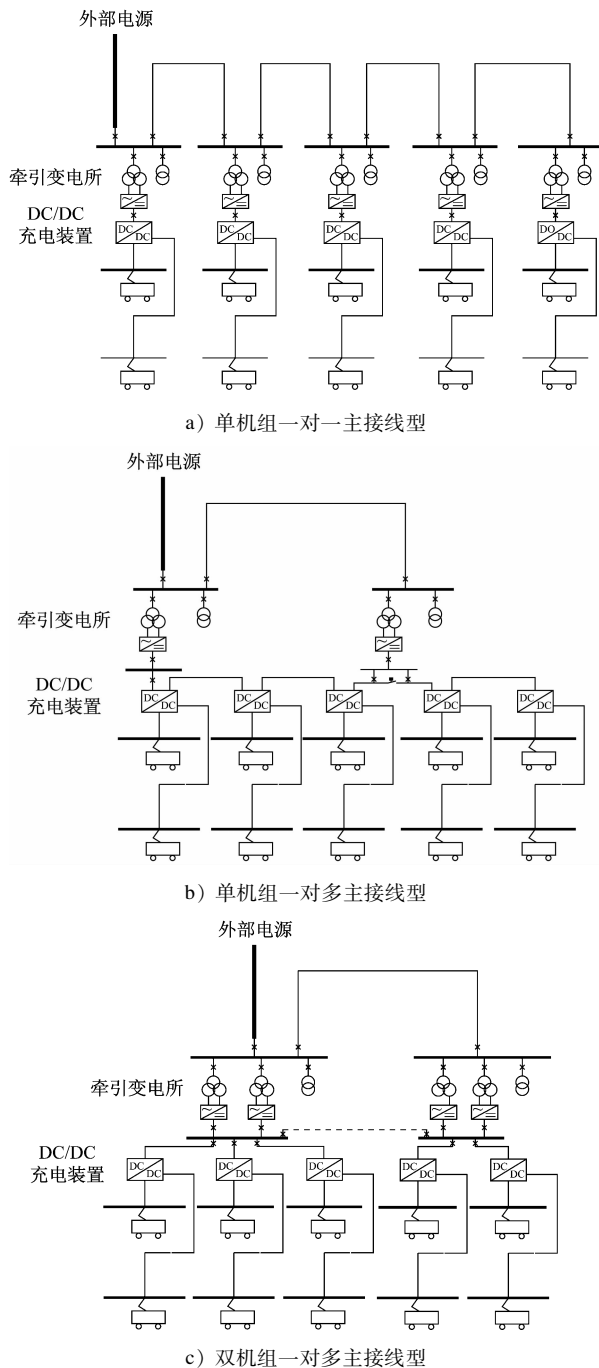


图4 超级电容储能型无网供电系统主接线示意图

从表2可以看出：单机组一对一型主接线形式由于区间无直流电缆敷设，车辆在车站内完成回流，故电缆维护的工作量小，无钢轨电位和杂散电流的问题，但由于每站都设置牵引所且不相支

表 2 无网供电系统主接线对比表

比较内容	单机组一对一型	单机组一对多型	双机组一对多型
供电可靠性	中	较高	高
工程可实施性	变电所数量多, 征拆量大, 变电所选址困难	变电所数量少, 占地小, 选址方便	变电所数量少, 但设备数量多, 选址较困难
工程投资	中	低	高
运营维护	设备维护量大, 但电缆维护工作量小	设备维护工作量小, 但电缆维护工作量大	设备维护及电缆维护工作量均偏大
回流系统	仅在车站利用钢轨回流, 区间无轨电位和杂散电流问题	若利用钢轨回流, 则全线需考虑限制钢轨电位和杂散电流防护问题	若利用钢轨回流, 则全线需考虑限制钢轨电位和杂散电流防护问题

援,结果带来供电可靠性降低、工程可实施性差且投资高的问题;单机组一对多型主接线形式供电可靠性较高,变电所数量及各变电所内设备数量均较少,工程实施性好,投资低,设备维护工作量小,但区间电缆工程量增大,且存在钢轨电位偏高及杂散电流腐蚀问题;双机组一对多型主接线形式的设计方案与单机组一对多型主接线形式类似,由于采用双机组,使得供电可靠性进一步提高,但对应工程可实施性、工程投资方面与单机组一对多型相比没有优势。综合以上分析,笔者认为,针对超级电容储能型现代有轨电车无网供电系统的设计宜采用单机组一对多型主接线形式。

2.5 运行方式分析

现代有轨电车无网供电系统中,需要经常变更系统的运行方式,以使系统安全、经济、合理运行,或满足检修工作的要求。常见的无网供电系统运行方式包括正常情况、外部电源故障、牵引所故障以及充电装置故障。

在正常运行情况下,中压环网联络开关分开,各路外部电源负责本供电分区范围内的所有负荷,各牵引所向本所范围内的充电装置输出电能,满足超级电容有轨电车的充电要求。

在一路外部电源故障退出的情况下,闭合中压环网联络开关,由相邻外部电源通过中压环网越区供电,负担本区电源及故障电源范围内的所有高峰小时牵引负荷及动力照明的一、二级负荷。

在任一牵引所解列退出的情况下,运行方式需根据不同的主接线形式具体分析:

(1)对单机组一对一型主接线形式,牵引所解列等同于其对应的充电装置故障,此时需依靠超级

电容储能元件的续航能力,在故障车站停车时不充电,运行至下一正常供电的充电装置时再补充电能;

(2)对单机组一对多型主接线形式,牵引所解列时闭合所内越区隔离开关,由相邻牵引所共同承担故障所的供电负荷,构成大双边供电方式,末端牵引所故障时,由相邻牵引变电所越区单边供电;

(3)对双机组一对多型主接线形式,牵引所之间通过直流支援电缆连接,相互支援,任一牵引所解列后由相邻支援牵引所负担本所和故障所内所有高峰小时牵引负荷及动力照明的一、二级负荷。

在充电装置故障退出运行的情况下,通常不考虑相邻充电装置间的相互支援,而是依靠储能元件本身的能量冗余为车辆提供续航。影响车辆续航能力的因素主要有以下几点:

- (1)储能元件本身可用的能量;
- (2)车辆的能耗,含牵引用电部分和辅助用电部分;
- (3)车辆再生制动工况下回收能量的比率;
- (4)具体的线路条件情况,如长大坡段、平交道口等。

车载超级电容的储能量可表示为:

$$E_c = \int Idt = \int C \frac{dU}{dt} dt = \int_{U_0}^{U_1} CdU = \frac{1}{2}C(U_1^2 - U_0^2)$$

(3)

式中:

C ——车辆超级电容总容量,其值等于串并联超级电容单体的容量总和。

车载超级电容的储能量配置根据列车编组长度的不同而变化,常见的配置为 10 ~ 20 kWh。而现代有轨电车的平均能耗可采用传统城轨列车的能耗计算式进行估算:

$$E_{总} = E_{牵引} + E_{辅助} = F_{牵引} V_A t_{牵引} + P_{辅助} t_{运行}$$

(4)

式中:

- $F_{牵引}$ ——列车总牵引力;
- V_A ——列车起动过程中恒转矩区终速;
- $t_{牵引}$ ——列车总牵引时间;
- $t_{运行}$ ——列车总运行时间。

结合现代有轨电车的车辆参数及运营经验,列车平均单位耗电量约为 4 ~ 6 kWh/km。若考虑线路坡度、制动能量回收及平交道口延误等因素的影响,可认为超级电容储能型现代有轨电车的有效续

航里程约为 $2 \sim 3 \text{ km}^{[9]}$ 。

文献[10]指出,我国现代有轨电车的车站间距一般在 $0.6 \sim 1.0 \text{ km}$,可以满足单个充电装置故障退出运行,车辆跨站充电的续航里程要求。在工程实际中,若出现长大区间或多个路口延误的情况,可根据具体条件在区间设置补充充电装置并配备移动充电装置,以保证车辆在区间的正常行驶。

3 结论

本文以超级电容储能型现代有轨电车及其供电系统为主要研究对象,重点分析了无网供电系统的设计要点,并得出以下结论:

(1)在接触网持续授流条件下,车辆牵引负荷为动态负荷,而在超级电容车站充电条件下,车辆牵引负荷为静态负荷。

(2)无网供电系统外部电源推荐采用开闭所相对分散供电方式,外部电源容量需根据牵引负荷特性校核。

(3)牵引负荷根据超级电容的充电特性确定,总体呈现脉冲状,牵引功率的计算采用均方根值,并考虑列车同时充电系数。

(4)无网供电系统的主接线形式可分为 3 种,通过技术经济比选,推荐采用单机组一对多型的主接线形式。

(5)根据充电装置故障退出的运行方式分析,得出了超级电容储能型现代有轨电车的有效续航里程和设计方案的匹配性。

参考文献

- [1] 沈继强. 现代有轨电车车辆选型和供电方式[J]. 中国市政工程,2012(5):68.
- [2] 吴泳江,李芾. 现代有轨电车新型供电方式发展及运用现状[J]. 电力机车与城轨车辆,2014(5):5.
- [3] 朱亮,张继彤,张济民. 低地板有轨电车无接触网供电技术的研究[J]. 城市轨道交通研究,2014(9):84.
- [4] 胡斌. 城市轨道交通地面式超级电容储能装置控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [5] 王德伟. 基于功率分配的车载超级电容储能系统控制策略的研究[D]. 北京:北京交通大学,2011.
- [6] 于松伟,杨兴山,韩连祥,等. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008:380.
- [7] 张剑涛,杨珂,杨锐,等. 有轨电车供电系统负荷等级与外电源方案[J]. 都市快轨交通,2014,27(2):113.
- [8] 苏秀娥,朱玲,田炜,等. 基于超级电容有轨电车的充电装置控制策略研究[J]. 电力电子技术,2016(4):60.
- [9] 王江丽,刘桂军. 储能式有轨电车充电装置设置间距研究[J]. 铁路工程技术与经济,2017(5):16.
- [10] 王远回,宗传苓,刘永平. 深圳市现代有轨电车发展策略[J]. 城市轨道交通研究,2014(6):11.

(收稿日期:2017-09-21)

(上接第 127 页)

务。线路延伸后,以市域快线功能为主,车厢站立密度为 $4 \text{ 人}/\text{m}^2$,采用大小交路、站站停列车的开行方案,同时考虑人民公园站—双流机场 2 航站楼站的备用交路,以应对机场突发情况。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城市轨道交通工程项目建设标准:建标 104-2008[S]. 北京:中国计划出版社,2008.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [3] 四川省住房和城乡建设厅. 成都市地铁设计规范:DB J51/T 074—2017[S]. 成都:西南交通大学出版社,2017.
- [4] 西南交通大学. 成都市轨道交通 10 号线客流预测报告(补充)[R]. 成都:西南交通大学,2014.

- [5] 中国地铁工程咨询有限责任公司. 成都轨道交通 10 号线二期工程初步设计客流预测(修编)[R]. 成都:中国地铁工程咨询有限责任公司,2016.
- [6] 中国地铁工程咨询有限责任公司. 成都市轨道交通第四期建设规划(2017—2022 年)客流预测(送审稿)[R]. 成都:中国地铁工程咨询有限责任公司,2017.
- [7] 中铁上海设计院集团有限公司. 成都市轨道交通 10 号线一期工程复合功能、运营组织和差异化服务研究专题[R]. 上海:中铁上海设计院集团有限公司,2014.
- [8] 中铁上海设计院集团有限公司. 成都轨道交通 10 号线二期工程行车组织专题研究[R]. 上海:中铁上海设计院集团有限公司,2016.
- [9] 中铁上海设计院集团有限公司. 成都轨道交通 10 号线三期工程运营组织方案专题研究[R]. 上海:中铁上海设计院集团有限公司,2017.

(收稿日期:2018-06-24)