

# 市域铁路电力供电系统关键技术分析

廖芳芳

( 中铁第四勘察设计院集团有限公司,430063,武汉//教授级高级工程师)

**摘 要** 针对 AC 25 kV 交流供电制式市域铁路车站电力供电系统的负荷分布特点,提出其 6 个关键技术:中压网络电压等级的选择、双环网供电及环口的设置、供电系统接地方式的选择、单芯电力电缆金属层接地方式、配电所无功补偿的设置及配电所跨所供电实现方式,并对以上 6 个关键技术进行逐一详细分析和深入研究,以期为今后市域铁路电力供电系统的设计提供有益的参考和依据。

**关键词** 市域铁路;电力供电系统;交流供电制式;关键技术

**中图分类号** U239.58

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.12.008

## Analysis of Key Technologies in Urban Regional Railway Power Supply System

LIAO Fangfang

**Abstract** In this paper, six key technologies of 25 kV AC power supply system for urban regional railway station are put forward according to the load distribution characteristics of power supply system, including selection of voltage level for medium voltage network, setting of double-loop network power supply and loop port, selection of neutral grounding modes for power supply system, grounding mode of single-core power cable sheaths, design of reactive compensation at distribution substation, and across-station power supply of distribution substations. Then, each of the six key technologies is analyzed and studied in details, in order to provide useful reference and basis for the future design of municipal railway power supply system.

**Key words** urban regional railway; power supply system; AC power supply system; key technology

**Author's address** China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

市域铁路是站间距、速度目标等介于铁路和城市轨道交通两者之间的一种交通制式。市域铁路与城市地铁和轻轨相比,具有速度快、投资少、审批快等特点,还能实现与国家铁路干线的互联互通,增强城市对外辐射能力。市域铁路的设计时速一般为 120~

160 km/h,车站间距短且密度大。近些年来,市域铁路一般采用 2 种制式,一种为 DC 750~1 500 V 直流供电方式,另一种为 AC 25 000 V 交流供电方式。本文主要针对交流供电制式的市域铁路进行分析与研究。

某市域铁路车站布置如表 1 所示。该市域铁路全长 85.9 km。全线共设置车站 16 座,其中地下站为 4 座,地面站为 4 座,高架站为 8 座。平均站间距为 5.7 km,分别在 AK17+900 和 AK52+300 设置牵引变电所。从表 1 可以看出,市域铁路站间距较地铁长,但比铁路车站布置密集。因此采用何种电压等级供电是市域铁路电力供电系统首要解决的问题。

表 1 某市域铁路车站及车站变压器布置一览表

序号	车站名称	里程	车站变压器容量/kVA
1	地下站 1	AK0+000	2×(2×1 600)
2	地下站 2	AK3+600	2×(2×1 600)
3	高架站 1	AK10+800	2×500
4	地面站 1	AK17+900	2×630
5	地面站 2	AK22+750	2×630
6	高架站 2	AK29+700	2×500
7	地下站 3	AK37+900	2×(2×1 600)
8	高架站 3	AK40+900	2×500
9	地面站 3	AK47+100	2×630
10	地面站 4	AK52+300	2×630
11	高架站 4	AK57+500	2×500
12	高架站 5	AK61+500	2×500
13	高架站 6	AK69+900	2×500
14	高架站 7	AK75+300	2×500
15	高架站 8	AK81+350	2×500
16	地下站 4	AK85+900	2×(2×1 600)

## 1 中压网络电压等级的选择

我国电力系统中压网络标准电压等级有 3 种,分别为 35 kV、20 kV 和 10 kV。中压环网在市域铁路供电系统中不仅投资比重大,而且对供电系统的安全可靠性影响很大。因此,中压环网的选择恰当与否关系到整个供电系统设计是否合理。根据市域铁路负荷分布特点,可以采用如下 3 种供电方案

进行比选。

### 1.1 方案 1: 10 kV 双贯通供电方案

该方案采用铁路传统供电方式, 全线新建两路 10 kV 电力贯通线路, 经调压器馈出供电。其中, 一路为一级负荷贯通线, 另一路为综合负荷贯通线, 为各车站通信、信号负荷供电。另外各车站综合变电所电源均由地方接引两路 10 kV 电源。

该方案投资较低, 但与城市电网接口太多, 受城市电网的影响大, 不利于地区电网系统管理和运行维护。

### 1.2 方案 2: 20 kV 双环网供电方案

结合牵引变电所的设置, 与牵引变电所合建 110 kV/20 kV 变配电所。由于 20 kV 供电系统的供电能力较 10 kV 供电系统大大提升, 因此新建的两路 20 kV 电力环网线路可供应全线各车站及区间所有负荷用电。

该方案投资低, 与供电部门的接口少, 受城市电网的影响小, 供电能力较 10 kV 供电系统大大加强。但目前我国还未广泛使用 20 kV 电压等级, 相关技术不如 10 kV 电压等级成熟, 运营经验也不如 10 kV 电压等级丰富。该方案仍处于推广阶段, 目前仅有温州和台州市域铁路采用 20 kV 电压等级。

### 1.3 方案 3: 35 kV 双环网供电方案

该方案采用 35 kV 中压网络的地铁传统供电方式, 结合牵引变电所的设置, 与牵引变电所合建 110

kV/35 kV 变配电所。新建的两路 35 kV 电力环网线路供全线各车站及区间所有负荷用电。

该方案供电能力大, 与供电部门的接口少, 受城市电网的影响小。但由于采用 35 kV 系统供电, 投资大大提高。对于市域铁路的负荷分布和容量而言, 无论输送功率、输送距离, 还是供电质量, 20 kV 电压等级完全能够满足要求。

综上对比, 随着电网的不断发展, 20 kV 电压等级将成为主流趋势, 故针对市域铁路自身的特点, 推荐采用 20 kV 中压网络供电等级。同时为了提高供电能力以及方便电缆敷设, 建议 20 kV 双环网供电线路采用单芯电缆。如温州市域铁路采用 20 kV 截面面积为  $185 \text{ mm}^2$  的单芯电缆, 台州市域铁路采用 20 kV 截面面积为  $150 \text{ mm}^2$  的单芯电缆。

## 2 双环网供电及环口的设置

较之传统铁路 10 kV 贯通线双端供电模式, 市域铁路采用双环网供电方式, 不仅大大提高了供电能力, 而且经济性比双贯通线路好。图 1 为典型市域铁路双环网供电系统图。由图 1 可知, 环网分界点一般设置在线路中心或负荷中心, 并且在环口处设置断路器保护以便于缩减故障范围, 正常情况下, 环口断路器断开, A 所和 B 所分别对各自供电分区供电, 当区间某处发生短路故障时, 断开故障点相邻两侧负荷开关, 合上环网分断开关为线路供电。

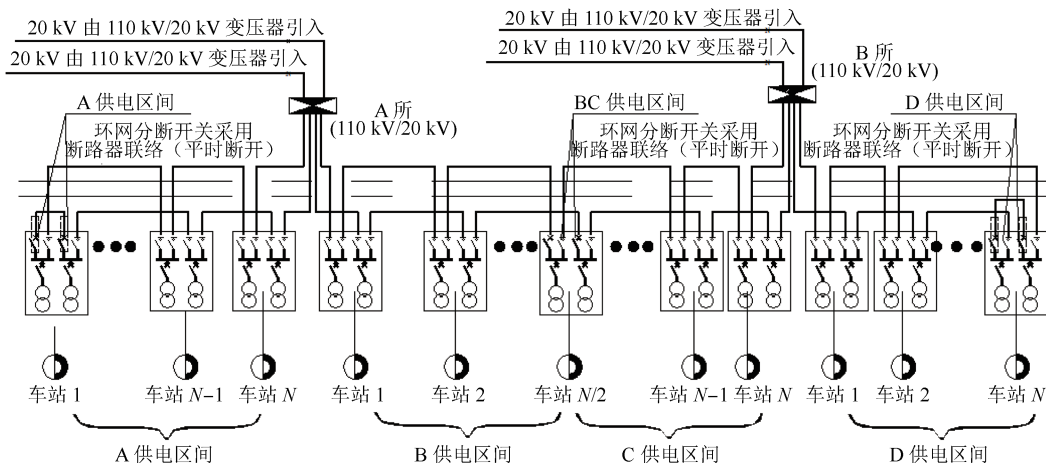


图 1 典型市域铁路双环网供电系统图

## 3 供电系统接地方式的选择

供电系统接地方式的选择, 亦是市域铁路供电系统的一大难题。一般系统接地分中性点直接接地、中性点经消弧线圈接地及中性点经低电阻接地

3 种方式。当系统单相接地故障电流不大于 10 A 时, 应采用不接地系统; 当系统单相接地故障电流不大于 150 A 时, 可采用中性点经低电阻接地方式或中性点经消弧线圈接地方式; 当系统单相接地故障电流大于 150 A 时, 宜采用中性点

经低电阻接地方式。由此可见,系统接地方式的确定,关键在于计算系统单相接地故障电容的电流  $I_{cd}$ :

$$I_{cd} = 3\omega C_y U_\varphi \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中:

- $C_y$ ——单位长度电缆的接地电容,  $\mu\text{F}/\text{km}$ ;
- $U_\varphi$ ——系统的相电压,  $\text{kV}$ ;
- $\omega$ ——系统的角频率,  $\text{rad}/\text{s}$ 。

经计算,20 kV 电缆线路接地故障电容的电流值见表 2。

表 2 20 kV 电缆线路接地故障电容电流值		
电缆导体截面面积/ $\text{mm}^2$	$C_y/(\mu\text{F}/\text{km})$	$I_{cd}/\text{A}$
120	0.223	2.95
150	0.241	3.19
185	0.267	3.54
240	0.291	3.85

注:考虑到其他设备的电容电流,表中的数据均需乘以系数 1.16

在上述计算的基础上,综合考虑 20 kV 配电所的间距及不同工况下的运行方式,计算得到市域铁路系统单相接地故障电容的电流大于 150 A,故系统接地方式选用中性点经低电阻接地。

明确接地方式后,在设计过程中需计算的中性点经低电阻接地的接地变压器容量是不可忽略的一个重要参数。根据相关规范规定,市域铁路低电阻接地方式的接地电阻按单相接地电流不大于 400 A 考虑,接地变压器容量按照 IEEE-C 62.92.3 标准规定的变压器 10 s 的允许过载系数为额定容量的 10.5 倍计算,由于通过接地变压器中性点的短路电流为 400 A,流过接地变压器各相绕组的短路电流为 133 A,则通过计算得到接地变压器的短时容量为 4 849.6 kVA,额定容量为 462 kVA,故选用 500 kVA 接地变压器。

4 单芯电力电缆金属层接地方式

由于市域铁路 20 kV 电力电缆采用单芯电力电缆,那么 20 kV 单芯电力电缆金属层接地方式就是一个不容忽视的问题,也是系统的一个关键参数。若 20 kV 单芯环网电缆同一般三芯电缆线路采用同样的接地方式,金属护层两端三相互联后直接接地,其金属护层中的感应环流可达到线芯电流的 50%~95%,感应电流所产生的热损耗极大地降低了电缆载流量,并加速了电缆主绝缘电-热老化。若单芯电缆金属护层一端三相互联并接地,另一端

不接地,则电缆金属护层中虽无环流,但当雷电波或内部过电压沿电缆线芯流动时,电缆金属护层不接地端会出现较高的冲击过电压,或当系统短路事故电流流经电缆线芯时,其护层不接地端也会出现很高的工频感应过电压。上述过电压可能击穿电缆外护层绝缘,造成电缆金属护层多点接地故障,影响电力电缆正常运行。因此要确定区间 20 kV 双环网单芯电缆金属层的接地方式,就必须分析电缆线路正常感应电势的来源。

对于电气化铁路,计算单芯电缆金属护套感应电动势时,接触网电流的影响不可忽略<sup>[2-3]</sup>。根据相关资料,接触网电流对单芯电力电缆金属护套感应电势  $E_{b1}$ <sup>[1]</sup> 的计算如下:

$$E_{b1} = \left(\frac{\omega \mu i_c}{2\pi}\right) \ln \frac{S_F}{S_C} + \left(\frac{\omega \mu i_{c,0}}{2\pi}\right) \ln \frac{S_{F,0}}{S_{C,0}} \tag{2}$$

式中:

- $S_C, S_F$ ——分别表示同股道接触网、正馈线(回流线)与 B 相电缆的中心距,  $\text{m}$ ;
- $S_{C,0}, S_{F,0}$ ——分别表示相邻股道接触网、正馈线(回流线)与 B 相电缆的中心距,  $\text{m}$ ;
- $\mu$ ——介质磁导率,取  $4\pi \times 10^{-4} \text{ H}/\text{km}$ ;
- $i_c, i_{c,0}$ ——分别表示同股道和相邻股道接触网的电流(两者一般相等),  $\text{A}$ 。

计算单芯电缆金属护套感应电动势时,亦需考虑单芯电缆本体及单芯电缆之间在金属层上的感应电势<sup>[4-5]</sup>。以 B 相(中间相)为例,按 3 根电缆呈等边三角形布置,单位长度的正常感应电势  $E_{b2}$  按下式计算:

$$E_{b2} = i_b \left(2\omega \ln \frac{S}{r}\right) \times 10^{-4} \tag{3}$$

式中:

- $r$ ——电缆金属层的平均半径,  $\text{m}$ ;
- $i_b$ ——电缆导体的正常工作电流,  $\text{A}$ ;
- $S$ ——各相邻电缆间的中心距,  $\text{m}$ 。

综上分析,B 相电缆每公里金属护套的总感应电动势  $E_b$  可以简化如下:

$$E_b = E_{b1} + E_{b2} = \frac{\pi}{50} i_c \left(\ln \frac{S_F}{S_C} + \ln \frac{S_{F,0}}{S_{C,0}}\right) + \frac{\pi}{50} i_b \ln \frac{S}{r} \tag{4}$$

现以温州市域铁路 S1 线为例,线路区间 20 kV 电缆采用 YJV62-18/20 kV 截面面积为 185  $\text{mm}^2$  的单芯电缆,各相邻电缆之间的中心距为 45.5 mm,配电所引出 20 kV 线路的正常电流为 253 A(主变压

器容量为12 500 kVA,按 70%负载率考虑),接触网的最大电流为 1 000 A。

根据温州市域铁路 S1 线的相关设计文件,计算得到: $S_C$  为 6.335 m, $S_F$  为 6.462 m, $S_{C,0}$  为 8.840 m, $S_{F,0}$  为 11.700 m。通过查阅电缆手册,得到 YJV62-18/20 kV 截面面积为 185 mm<sup>2</sup> 电缆金属层的平均半径为 17.25 mm。

通过以上公式计算得到区间 20 kV 电缆线路每公里金属护套的总感应电动势为 34.29 V。根据 GB 50217—2007 第 4.1.7 条规定,结合 YJV62-18/20 kV 截面面积为 185 mm<sup>2</sup> 单芯电缆配盘,区间双环网线路在不超过 1.5 km 处设置 20 kV 电缆中间接地箱。接地箱内电缆金属层一端采用直接接地,另一端金属层经护层电压限制器接地,以确保区间 20 kV 电缆线路的金属层上任一点正常感应电压的最大值满足规范要求。

### 5 配电所无功补偿的设置

由于市域铁路区间采用 20 kV 环网电缆线路集中供电,存在电缆线路长和电压等级高等特点,如果不合理设置系统无功补偿参数,将会出现无功功率返送现象,会严重降低 20 kV 供电系统的供电质量,故在 20 kV 配电所母线侧集中安装无功补偿装置尤为重要。

无功补偿的设置,需要分析整个 20 kV 供电系统无功容量的来源,主要包括:①110 kV 电缆侧产生容性无功;②20 kV 环网电缆线路的容性无功;③主变压器产生的感性无功;④20 kV/0.4 kV 车站变压器产生的感性无功。

电缆线路产生的固定容性无功是计算 20 kV 配电所不可忽略的一大要素。尤其在运行初期,负载率低,电缆发出的容性无功功率特别突出。而计算电缆线路容性无功功率,其关键参数就是计算电缆正常情况下的电容电流  $I_{c0}$ :

$$I_{c0} = \omega C_y U_{\varphi} \times 10^{-3} \tag{5}$$

根据式(5),可得常见 110 kV 和 20 kV 电缆线路正常运行时的电容电流值和容性无功功率(见表 3~4)。

以表 1 工程为例,110 kV 变电所的电源线为长 1 km、截面面积为 400 mm<sup>2</sup> 的电缆线路,20 kV 环网线路供电臂长 23 km,采用截面面积为 150 mm<sup>2</sup> 的电缆,主变容量为 12 500 kVA。经计算,电缆线路产生的最大容性无功功率为 1 359 kvar。供电系统

表 3 常见 110 kV 电缆线路正常运行时电容电流值和容性无功功率

电缆导体截面 面积/mm <sup>2</sup>	$C_y$ / (μF/km)	$I_{c0}$ / (A/km)	最大容性无功 功率/(kvar/km)
240	0.129	2.70	515
300	0.139	2.91	555
400	0.156	3.27	623
500	0.169	3.54	674

表 4 常见 20 kV 电缆线路正常运行时电容电流值和容性无功功率

电缆导体截面 面积/mm <sup>2</sup>	$C_y$ / (μF/km)	$I_{c0}$ / (A/km)	最大容性无功 功率/(kvar/km)
120	0.223	0.848	29
150	0.241	0.917	32
185	0.267	1.02	35
240	0.291	1.106	38

的感性无功主要是由主变压器和区间 20 kV/0.4 kV 车站变压器产生的,由变压器空载无功损耗和负载无功损耗两部分组成。变压器无功功率损耗  $\Delta Q_T$  可按下式计算:

$$\Delta Q_T = \Delta Q_0 + \Delta Q_k \left( \frac{S_c}{S_r} \right)^2 = \frac{\alpha_l S_r}{100} + \frac{\alpha_u S_r}{100} \left( \frac{S_c}{S_r} \right)^2 \tag{6}$$

式中:

$\Delta Q_0$ ——变压器空载无功损耗,kvar;

$\Delta Q_k$ ——变压器满载无功损耗,kvar;

$S_c$ ——变压器的计算负荷,kVA;

$S_r$ ——变压器的额定容量,kVA;

$\alpha_l$ ——变压器的短路电压(亦称阻抗电压)所占百分数,一般为变压器上的铭牌数据,110 kV 变压器取 10.5,20 kV 变压器取 6;

$\alpha_u$ ——变压器的空载电流所占百分数,亦为变压器上的铭牌数据,110 kV 变压器取 0.8,20 kV 变压器取 0.5。

表 5 为不同负载率下系统的感性无功功率。由表 5 可见,当车站负载率达到 80% 以上时,供电系统感性无功才开始与电缆线路的容性无功基本抵消。而在线路运营初期,电缆发出的容性无功功率远远大于主变压器和车站变压器负荷的感性无功,即电缆发出的容性无功功率只能被主变压器和车站变压器负荷的感性无功部分抵消。具体抵消数值与供电系统负荷的负载率密切相关。

表 5 不同负载率下供电系统感性无功功率 kvar

项目	20 kV 车站变压器		110 kV 主变压器		感性无功功率
	负载无功损耗	空载无功损耗	负载无功损耗	空载无功损耗	
满载 100%	297.6	24.8	1 312.5	100	1 734.9
重载 80%	190.5	24.8	840.0	100	1 155.3
一般 50%	74.4	24.8	328.1	100	527.3
轻载 10%	3.0	24.8	13.1	100	140.9
空载 0%		24.8		100	124.8

因此,对于市域铁路 20 kV 配电所,在运营初期及非运营时段(如夜间检修等),供电系统由于环网电缆线路呈容性无功,此时需要在 20 kV 配电所母线侧并联电抗器补偿装置(如电抗器、MCR(磁控电抗器)、SVG(静止无功发生器)<sup>[6]</sup>等),利用该装置吸收电缆产生的容性无功功率;在运营时段,随着运行年度的延伸及供电负荷的增加,当系统容性无功功率与感性无功功率达到平衡甚至感性无功大于容性无功,系统逐渐呈感性无功,则需要进行电容补偿。

由以上分析可知,对于市域铁路供电系统,配电所的无功补偿需采用动态无功补偿,如采用 SVG 动态无功补偿方式。若考虑经济性,亦可采用磁控电抗器与电容器组配合,其中电容器的容量可根据本线路中感性无功的最大值设定。采用以上两种方式均可实现无功功率从感性至容性的连续无极调节,以保证系统无功合格,并提高供电质量。

6 配电所跨所供电实现方式

根据相关规范规定,市域铁路相邻变配电所宜具备越区供电能力<sup>[7-8]</sup>。图 1 中,若 A 所停电,B 所除通过合上 BC 供电区间环网开关为 B 区供电外,还需跨越 A 所为 A 供电分区供电。具体可采用以下两种方式:

1) 自动实现方式:通过断开 A 所内电源进线断路器后,远动合闸区间环口断路器,然后合闸 A 所内主母线上各环网馈出断路器,以实现跨所供电。本方式自动化程度高,但配电所内保护设置较为复杂。

2) 手动实现方式:将 A 所整体退出运行,在配电所室外设置跨所供电负荷开关箱,通过手动操作方式来实现跨所越区供电功能。本方式的实现及配电所所内保护均较为简单,但投资较高,需额外增加 2 套跨所供电装置。

7 结论

根据以上分析,针对市域铁路自身的特点,可得出如下结论:

1) 市域铁路电力供电系统的中压网络电压等级推荐采用 20 kV 中压网络供电,同时为了提高供电能力及方便电缆敷设,20 kV 双环网供电线路宜采用单芯电缆。

2) 市域铁路电力供电系统推荐采用双环网供电方式,并在区间负荷中心设置环口,同时为了便于缩减故障范围,环口处应设置断路器进行保护。

3) 市域铁路电力供电系统接地方式推荐采用中性点经低电阻接地,并根据单相接地电流合理设置接地变压器容量。

4) 通过计算区间单芯电力电缆每公里金属护套的总感应电动势,合理设置区间电缆中间接地箱的间距;中间接地箱内电缆金属层一端采用直接接地,另一端金属层经护层采用电压限制器接地。

5) 根据市域铁路供电系统的容性无功功率与感性无功功率的大小及变化,在配电所设置 SVG 动态无功补偿或采取磁控电抗器与电容器组的配合方式进行集中补偿,以提高供电质量。

6) 市域铁路相邻变配电所跨所供电方式根据需要设置自动实现和手动实现两种方式。

参考文献

[1] 孙建明,丁坚勇,董世欢.市域铁路电力供电方案及可靠性分析[J].城市轨道交通研究,2015(12): 22.

[2] 李文豪,崔校玉,陈维荣,等.客运专线 10 kV 单芯电缆接地方式的研究[J].铁道工程学报,2009(4): 39.

[3] 刘欣,崔翔.电气化铁路接触网雷电感应过电压计算及其闪络概率研究[J].华北电力大学学报,2013(3): 10.

[4] 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.电力工程电缆设计标准:GB 50217—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.

[5] 邱昊,郑志源.高压单芯电缆交叉互联接地方式优化研究[J].电线电缆,2014(6): 33.

[6] 郑勇峰.浅谈动态无功补偿(SVG)设计在城市轨道交通供电系统中的应用[J].科技创新与应用,2018(3): 128.

[7] 中国土木工程学会.市域快速轨道交通设计规范:T/CCES 2—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[8] 中国铁道学会.市域铁路设计规范:T/CRS C0101—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.

(收稿日期:2018-10-23)