

Analysis of Current Carrying Capacity of Contact Network for Long Distance Power Supply in Electrified Railways

Shuangling Liu

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu 610031, Sichuan Province, China

Abstract

The electrified railway lines in China primarily adopt two power supply methods: Direct Feeding (DF) and Autotransformer (AT) Feeding. Although the AT feeding method offers advantages such as low traction network impedance and long power supply distance, it also has drawbacks including complex traction substation facilities and extensive civil engineering requirements. This paper introduces the technical solutions of "Cable + Direct Feeding" and "Overhead Line + Direct Feeding" suitable for long-distance power supply in electrified railways, with a focus on studying long-distance power supply technology under direct feeding conditions. Based on the equivalent model and traction network impedance of the "Overhead Line + Direct Feeding" method, theoretical calculations are conducted on the current-carrying capacity of the catenary under this configuration. The research provides a theoretical basis for selecting catenary conductor configurations in long-distance power supply systems.

Keywords

Electrified Railway; Long-Distance Power Supply; Catenary Current-Carrying Capacity

电气化铁路长距离供电接触网载流能力研究

刘双玲

中铁二院工程集团有限责任公司, 中国·四川成都 610031

摘要

中国电气化铁路线路主要采用直接供电和AT供电两种方式, AT供电方式虽然具有牵引网阻抗小、供电距离长等优点, 但也有牵引变电所设施较多、土建工程较大等缺陷。本文主要介绍适用于电气化铁路长距离供电的“电缆+直供”和“架空线+直供”技术方案, 并主要研究直供方式下的长距离供电技术, 根据“架空线+直供”供电方式下的等值模型及牵引网阻抗, 重点对“架空线+直供”方式下接触网载流能力进行理论计算, 为长距离供电方式下选择接触网导线的配置提供理论依据。

关键词

电气化铁路; 长距离供电; 接触网载流能力

我国的电气化铁路供电方式主要有带回流线直接供电方式、BT(吸流变压器)供电方式、AT(自耦变压器)供电方式和CC(同轴电力电缆)供电方式。我国大牵引负荷的高速、重载铁路普遍应用全并联AT供电方式, 实现上下行牵引网电气上的并联关系并提供一定的供电能力, 但AT供电方式也有牵引变电所设施较多、站前土建工程较大和运营维护难度较大等缺点。目前适用于电气化铁路长距离供电技术包括“电缆+直供”技术方案、“电缆+AT”和一种新型的电缆牵引供电技术方案等^[1], 若将电缆变为架空线可以降低投资, 同时在一定程度上仍能实现供电距离的增长。因此长距离供电方式下牵引网原有的电气性能将发生改变, 接触网导线的配置决定了其载流能力, 既可以反映牵引网供电能力, 也是决定供电臂长短的设置原则, 同时各导线的载

流量及其电流分配关系确定了接触网的悬挂载流量。因此, 接触网的载流能力同牵引供电方案相辅相成却又相互制约, 而在重载铁路的牵引供电系统中, 由于其牵引负荷大、牵引功率大的特点, 分析研究与其匹配的牵引网便必不可少。本文重点针对“架空线+直供”供电方式下接触网载流能力进行理论分析。

1 长距离供电技术

在线路长度给定的铁路线路中, 延长供电臂长度后显然可以增加供电距离, 使得原本二十几公里的供电距离延长到七八十公里乃至100公里以上, 既可以最大限度地减少电分相, 也可以减少铁路与公用电网的接口, 节省外部电源投资, 还有利于实现缺电或无电地区的铁路电气化。

1.1 “电缆+直供”技术方案

在直供方式下的长距离供电“电缆+直供”方式的结构如图1所示。

【作者简介】刘双玲(1993-), 女, 中国重庆人, 硕士, 从事电气化铁路接触网供电系统研究。

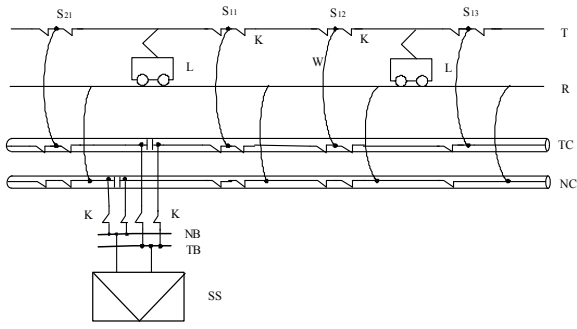


图 1 ‘‘电缆 + 直供’’方案

图中，接触网 T、钢轨 R 及回流电缆 NC 构成直供牵引网，牵引电缆 TC 与接触网 T 并联，牵引变电所 SS 通过牵引母线 TB 给 TC 供电，通过回流母线 NB 回流，在分段所 S21、S11、S12、S13 中，分段母线 W 将 TC 和接触网 T 并联起来，然后由开关 K 来实现分段。

由于电缆绝缘材料的相对介电常数较高，回路紧密布置，电缆芯线的分布电容大大增加，电容效应明显，尤其在空载时，牵引网压会延供电臂方向逐渐抬升，且其无功功率较高。因此需设置补偿装置如电抗器等降低牵引网的容抗，使网压尽量平稳，并提高功率因数。

1.2 ‘‘架空线 + 直供’’技术方案

将‘‘电缆 + 直供’’长距离供电技术方案的电缆由架空供电线替代变为‘‘架空线 + 直供’’技术方案，这样可以降低投资，供电能力会随之降低，但在一定程度上仍能实现供电距离的增长，‘‘架空线 + 直供’’技术方案如图 2 所示^[2]。

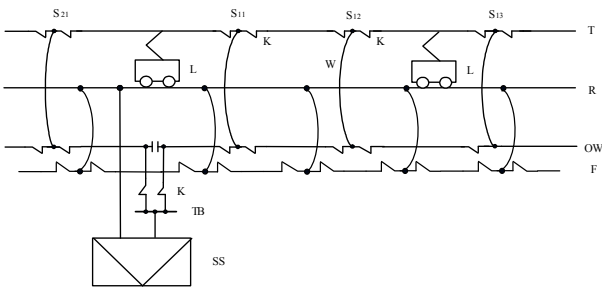


图 2 ‘‘架空线 + 直供’’方案

牵引变电所 SS 通过牵引母线 TB 向架空供电线 OW 供电，钢轨 R 与回流线 F 并联。每隔 5~10km 设置一个分段所 Sii，架空供电线 OW 与接触网 T 通过分段母线 W 并联，通过分段所开关实现分段检修和切除故障，且复线形式的线路可将上、下行接触网在分区所处并联。

同时还可以配套使用牵引网分段保护与测控系统装置及时切除故障提高线路供电的可靠性。因此，可选用成本投资较低、线路之间互阻抗影响较小的架空线而非电缆来实现长距离供电的目的。

2 接触网导线载流能力分析

针对‘‘架空线 + 直供’’供电方式下接触网载流能力进

行理论分析。

首先对接触网的载流需求进行估算，选择配置导线以满足牵引负荷对牵引网机械强度和载流能力等各方面的要求，并综合负荷电流大小及牵引网接触的悬挂载流量等因素选择牵引网导线型号和设计方^[3-5]。

2.1 计算方法

利用 Morgan 公式可以求得导线的稳态载流量：

$$I_n = \sqrt{\frac{\pi \epsilon S D (T_c^4 - T_0^4) + 9.92 \theta (Dv)^{0.485} - \alpha_s J_s D}{R}} \quad (1)$$

$$R = (1 + Y_s + Y_p) R_D = (1 + Y_s + Y_p) R_{20} [1 + \alpha(\theta_c - 20)] \quad (2)$$

其中， ϵ —黑体辐射系数，一般取 0.35； S —斯蒂芬-波尔茨曼常数，一般为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； D —导线直径 (m)； T_c 、 T_0 —导线允许最高工作温度、环境温度 (K)； θ_c —导线允许最高工作温度 ($^{\circ}\text{C}$)； v —风速 (m/s)； θ —导线温升； α_s —导体吸收系数，一般与 ϵ 值相等； α —材料的电阻温度系数 ($1/^{\circ}\text{C}$)； J_s —日照强度 (W/m^2)； $1 + Y_s + Y_p$ —交直流电阻比，一般取 1.003。

2.2 接触网线材参数

在电气化铁路使用的接触网线材中，由于不同的导线型号所具有的参数各有不同，因此根据 Morgan 公式求得的导线载流量也就不同。现主要针对铝包钢芯绞线、钢铝复合接触线等线材归纳计算所需的参数如表 1、表 2 和表 3 所示^[6]。

表 1 铝包钢芯绞线参数

型号	特性	外径 (mm)	计算截面积 (mm^2)	20 $^{\circ}\text{C}$ 直流电阻 (Ω/km)	允许温度 ($^{\circ}\text{C}$)	电阻温度系数 ($1/\text{K}$)
LBGLJ120/20		15.26	134.13	0.2382	80	418
LBGLJ120/35		16.24	156.49	0.2143	80	438
LBGLJ185/10		18	193.4	0.1544	80	504
LBGLJ185/25		18.9	211.29	0.1453	80	545

表 2 铜及铜合金绞线参数

型号	特性	规格 / 标称截面积 (mm^2)	计算外径 (mm)	计算截面积 (mm^2)	20 $^{\circ}\text{C}$ 直流电阻 (Ω/km)	持续电流 (A)
JT		150	15.8	148.07	0.122	580
JTM		95	12.5	93.27	0.244	385
JTMH		120	14.0	116.99	0.242	400
JTMH		150	15.8	147.11	0.193	465

表 3 钢 / 铝复合接触线参数

型号	特性	等效铜直流电阻截面积 (mm^2)	总标称截面积 (mm^2)	20 $^{\circ}\text{C}$ 直流电阻 (Ω/km)
CGLN250		120	250	0.149
CGLN195		85	195	0.198
CGLW215		100	215	0.184
CGLW173		80	173	0.230

2.3 导线载流量计算结果

牵引网导线的选择首先应满足牵引网负荷电流的要

求,并综合考虑电流分配和导线经济性等因素,根据研究对象——某条重载铁路线路的实际情况将接触线选择为CGLN250。

牵引网导线载流量的气象计算条件为:环境温度 40℃;导线工作温度 95℃;风速 0.5m/s;日照强度 1200W/m²。根据上述参数表及式(1)和式(2)得到各导线载流量的计算结果如表4所示。

表4 部分导线载流量计算结果

导线类型	95℃持续载流量(A)
LBGLJ185/25	545
LBGLJ240/30	630
CGLN250	455
JTMH150	480

2.4 接触网电流分配计算

加设的与接触线并联的架空线可以给接触线和钢轨分流,增强牵引网的供电能力。在研究供电线与接触线的分流系数时,将回流导线对电流分配的影响考虑在内,通过计算架空线+直供方式下接触网导线的电流分配系数,进一步量化其牵引网的性能。

若忽略上下行的互阻抗,则从图2所示的“架空线+直供”方案中可得知,单线形式下的牵引网可以看成是一个由架空供电线、承力索和接触线3根导线供电与两根钢轨和回流线3根导线回流构成的平行多导线系统^[7]。

设接触网的总电流(机车电流)为*i*,承力索、接触线和架空线组成的供电导线的电流分别为*i*₁、*i*₂、*i*₃,其分配系数分别为*a*₁、*a*₂、*a*₃;两根钢轨和回流线组成的回流导线的电流分别为*i*₂₁、*i*₂₂、*i*₂₃,其分配系数分别为*b*₁、*b*₂、*b*₃;设地中电流为*i*_c,其分配系数为*c*,即:

$$\begin{cases} i_{11} = a_1 i, i_{12} = a_2 i, i_{13} = a_3 i \\ i_{21} = b_1 i, i_{22} = b_2 i, i_{23} = b_3 i \\ i_c = c i \end{cases} \quad (3)$$

将各导线的电流统一成以供电导线电流的方向为正方向,由于供电电流之和与回流电流之和相等,因此有关系式:

$$i_{11} + i_{12} + i_{13} = -(i_{21} + i_{22} + i_{23} + i_c) = i \quad (4)$$

由式(3)和(4)可知:

$$\begin{cases} a_1 + a_2 + a_3 = 1 \\ b_1 + b_2 + b_3 = -1 - c \end{cases} \quad (5)$$

根据供电导线以及回流导线的并联连接关系,得到如下阻抗矩阵方程式:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_{11} \\ \Delta \dot{U}_{12} \\ \Delta \dot{U}_{13} \\ \Delta \dot{U}_{21} \\ \Delta \dot{U}_{22} \\ \Delta \dot{U}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & z_{15} & z_{16} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} & z_{25} & z_{26} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} & z_{35} & z_{36} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} & z_{45} & z_{46} \\ z_{51} & z_{52} & z_{53} & z_{54} & z_{55} & z_{56} \\ z_{61} & z_{62} & z_{63} & z_{64} & z_{65} & z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{13} \\ \dot{I}_{21} \\ \dot{I}_{22} \\ \dot{I}_{23} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中,Δ*U*为各供电导线及各回流导线的纵向压降;Z矩阵为各导线-地回路的自阻抗和互阻抗。假设所有的供电导线和回流导线均并联,则其导线压降都相等,即有:

$$\begin{cases} \Delta \dot{U}_{11} = \Delta \dot{U}_{12} = \Delta \dot{U}_{13} \\ \Delta \dot{U}_{21} = \Delta \dot{U}_{22} = \Delta \dot{U}_{23} \end{cases} \quad (7)$$

因此,由式(5)、(6)和式(7)可知:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1-c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{21}-z_{11} & z_{22}-z_{12} & z_{23}-z_{13} & z_{24}-z_{14} & z_{25}-z_{15} & z_{26}-z_{16} \\ z_{31}-z_{11} & z_{32}-z_{12} & z_{33}-z_{13} & z_{34}-z_{14} & z_{35}-z_{15} & z_{36}-z_{16} \\ z_{41}-z_{11} & z_{42}-z_{12} & z_{43}-z_{13} & z_{44}-z_{14} & z_{45}-z_{15} & z_{46}-z_{16} \\ z_{51}-z_{11} & z_{52}-z_{12} & z_{53}-z_{13} & z_{54}-z_{14} & z_{55}-z_{15} & z_{56}-z_{16} \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

所以当给定地中电流分配系数*c*时,可由上式求出各供电导线的电流分配系数*a*₁、*a*₂和*a*₃,再由其模值即可进行接触网载流量的确定。

2.5 接触网载流量计算

根据第2节和第3节可分别求出各单根导线的载流量及其电流分配系数,则计算的承力索、接触线和架空供电线的接触网载流量分别为:

$$\begin{cases} I_{T1} = I_{n1}/a_1 \\ I_{T2} = I_{n2}/a_2 \\ I_{T3} = I_{n3}/a_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中,*I*_{n1}、*I*_{n2}、*I*_{n3}分别为承力索、接触线和架空供电线的载流量,取其最小值作为接触网悬挂的最大载流量,使得所有供电导线的载流均不超过允许值。

因此选取的接触网载流量为:

$$I_T = \min\{I_{T1}, I_{T2}, I_{T3}\} \quad (10)$$

3 结论

本文主要介绍了两种适用于电气化铁路长距离供电技术方案,“电缆+直供”和“架空线+直供”技术方案,并主要研究“架空线+直供”方式下的长距离供电技术。同时对接触网电力传输效率的提升进行研究分析。

根据“架空线+直供”供电方式下的等值模型及牵引网阻抗,重点对“架空线+直供”方式下接触网载流能力进行理论计算,为长距离供电方式下选择接触网导线的配置提供理论依据。

参考文献:

- [1] 刘双玲.重载铁路牵引供电系统贯通式同相改造方案研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [2] 李群湛,解绍锋,郭镔,等.一种电气化铁路牵引供电加强构造:CN,CN205417236U[P].2016.
- [3] 罗健.重载铁路接触网关键技术方案研究与应用[J].铁道标准设计,2016,(60):122-125.
- [4] 吴凤娟.重载铁路牵引供电方案与接触网载流能力的分析[J].铁道机车车辆,2008,(28):70-73.
- [5] 楚振宇.复线电气化铁路直供牵引网载流能力的计算[J].铁道工程学报,2010,8:87-90.
- [6] GB 12971-2008.电力牵引用接触线[S].北京:中华人民共和国国家标准,2008.
- [7] 张俊骥,吴命利.电气化铁路接触网载流量计算方法[J].铁道学报,2015,12(37):40-45.