

采用自耦变压器供电的重载铁路牵引电缆贯通 供电系统供电方案

张 恒¹, 王 辉¹, 李群湛¹, 夏梦怡², 张 宇¹, 苏 鹏¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;
2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 电气化处, 陕西 西安 710043)

摘要:针对采用自耦变压器(AT)供电的重载铁路,为了进一步提升其运能和再生制动能量利用率,提出一种采用AT供电的重载铁路牵引电缆贯通供电方案。首先,介绍了采用AT供电的重载铁路牵引电缆贯通供电方案;其次,研究采用AT供电的重载铁路牵引电缆贯通供电系统供电能力,推导该供电系统的等值模型,分析其电流分布关系,计算牵引网等值阻抗,结合其电压分布关系推导出供电能力数学模型,为方案的初步设计提供依据;然后,以某实际重载线路改造设计为案例,分别对既有方案和所提方案的供电能力和能耗情况进行仿真验证;最后,对改造成本及运营经济性进行了分析。分析结果表明所提方案能够延长供电距离,降低牵引供电系统能耗,提高再生制动能量利用率,节省外部电力资源,经济效益较为显著。

关键词:重载铁路;AT供电;牵引电缆贯通供电;供电能力;再生制动能量;经济性分析

中图分类号:U 223.6

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010003

0 引言

以大秦铁路和神朔铁路为代表的重载铁路运输是我国发展的重要战略之一。铁路货物和资源运输的需求日益增加,对重载铁路运输能力的要求不断提高,因此需要开设更多万吨以上的重载列车,才能解决日益增长的铁路货物运输需求。

重载铁路牵引负荷功率大,对牵引网的传输功率需求高,因此对牵引供电系统的供电能力及电能传输可靠性有了更高的要求^[1-4]。我国重载铁路供电方式主要有带回流线的直供方式和自耦变压器(AT)供电方式2种^[2]。目前重载铁路牵引供电系统仍然存在一定不足,主要体现在^[2-6]:①接触网网压偏低;②牵引变电所过负荷现象严重;③在一些交直交型机车未普及应用的线路牵引变电所功率因数偏低;④列车过电分相时掉速、牵引供电系统供电能力发挥受限;⑤列车运行造成的负序问题;⑥列车再生制动能量利用率较低。

因此,需对已有和新建重载铁路牵引供电系统进行改造和技术创新。文献[7]提出一种采用直供方式的牵引电缆贯通供电方案,将其应用于城市轨道交通交流牵引供电系统,能够延长供电臂,取消电分相,改善电能质量问题。文献[8]对电缆牵引网CTN(Cable Traction Network)等值模型进行了推导,

收稿日期:2020-02-01;修回日期:2020-07-28

基金项目:四川省科技计划项目(2017CC0072, 2018GZ0044);
包神铁路集团课题(2018H010286)

Project supported by Sichuan Science and Technology Program(2017CC0072, 2018GZ0044) and the Project of Baoshen Railway Group(2018H010286)

并对补偿系数及电容效应进行了研究;文献[9]则对CTN的电缆选型及变压器容量计算进行了研究。

鉴于牵引电缆贯通供电系统的优点,针对采用AT供电的重载铁路,为进一步提升其运能和再生制动能量利用率,本文提出一种采用AT供电的牵引电缆贯通供电方案。介绍了采用AT供电的重载铁路牵引电缆贯通供电方案,推导了重载铁路牵引电缆贯通供电模型,分析了其电流分布特性,计算了牵引供电系统牵引网等值阻抗,并结合电压分布情况推导了供电能力数学模型。基于牵引电缆贯通供电系统供电能力的数学模型,以某实际线路改造设计为例,对该方案进行仿真验证,对比该线路既有供电方案,分析改造方案的供电能力、能耗情况及经济效益。

1 采用 AT 供电的重载铁路牵引电缆贯通供电方案

采用AT供电的牵引电缆贯通供电系统由主变电所MSS(Main SubStation)和CTN两部分组成,如图1所示。MSS如图1中①部分所示,由主变压器和同相供电装置(CPD)共同构成^[1,7],以单三相组合式同相供电装置为例,2套装置相互备用,连接在电力系统与CTN之间,起到电压等级转换和改善电能质量的作用,同相供电装置也可采用单相组合式同相供电。MSS可由电网500 kV、330 kV或220 kV三相电源供电,通过主变压器将电压等级转换为110 kV供给牵引电缆,再通过牵引变电所给接触网供电。CTN如图1中②部分所示,主要由牵引电缆C₁和C₂、单相接线牵引变压器(TT)、接触网回路(接触线T、钢轨R和馈线F)等部分构成^[7-9]。牵引电缆C₁和

C_2 可采用标准三相110 kV电缆中的两相,构成线电压为110 kV电压等级的供电回路,考虑备用,采用两回路,并沿铁路敷设;TT按一定间隔布置,连接牵引电缆和接触网,实现电压等级变换和电能传输的功能。

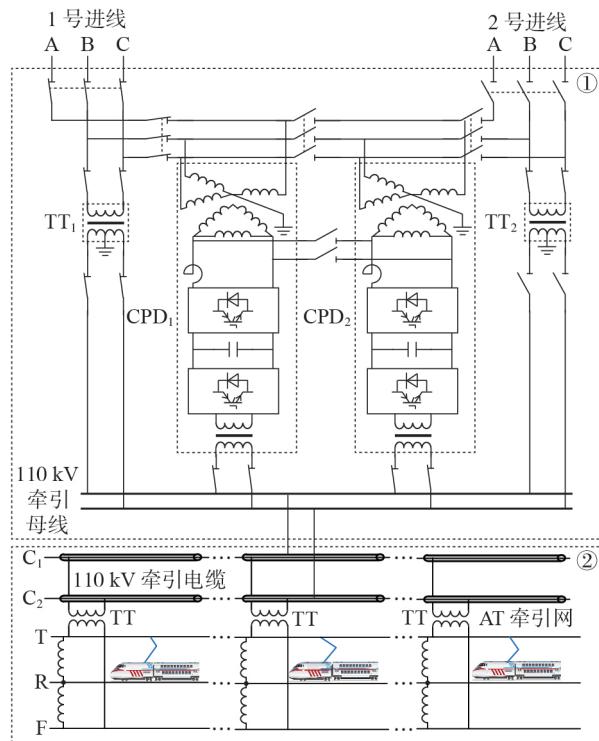


图1 牵引电缆贯通供电系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of traction cable co-phase connected power supply system

2 采用AT供电的牵引电缆贯通供电系统供电能力

2.1 CTN 电流及电压分布

当向AT牵引网中的机车供电时,图1中牵引电缆 C_1 和 C_2 电流方向相反,大小相同,故牵引电缆与AT接触网之间的互阻抗可以忽略不计^[8]。为便于分析,忽略CTN中AT的漏抗,将图1简化为图2所示的等效电路,即将2×27.5 kV(或55 kV)的AT网络等效为27.5 kV网络,包含牵引电缆回路及接触网等值

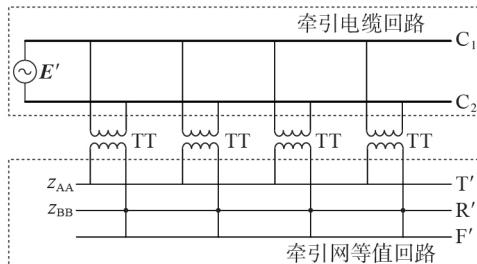


图2 CTN等效电路

Fig.2 CTN equivalent circuit

回路,简化后等效接触线、等效钢轨和等效馈线分别为 T' 、 R' 和 F' ,其中 F' 为一根理想导线^[10]。图中, E' 为MSS牵引母线电压。由文献[10]得到 T' 和 R' 的单位长度等值阻抗 z_{AA} 和 z_{BB} 分别为:

$$z_{AA} = (z_T + z_F - 2z_{TF})/4 \quad (1)$$

$$z_{BB} = (z_T + 2z_R + z_{RF} - 3z_{TR})/2 \quad (2)$$

其中, z_T 、 z_R 和 z_F 分别为接触线、钢轨和馈线的自阻抗; z_{TF} 、 z_{RF} 和 z_{TR} 分别为接触线与馈线、钢轨与馈线、接触线与钢轨间的互阻抗。

分别定义长回路(由MSS连接的供电电缆及接触网构成)与短回路(由机车所在位置两侧牵引变电所之间的供电电缆及接触网构成)^[7-8]。将图2中等效电路归算至27.5 kV牵引侧得到CTN等值回路1,如图3(a)所示。图中, I_{cp} 和 I'_{cp} 分别为机车位于第 p 座与第 $p+1$ 座牵引变电所之间时流经长回路和短回路电缆上的电流; I_p 和 I_{p+1} 分别为机车位于第 p 座与第 $p+1$ 座牵引变电所时通过长回路和短回路AT的电流; I 为机车电流。分别对图3(a)中回路1和回路2的电压降落进行分析,由于忽略了AT的漏抗,可等效为图3(b)所示的等值回路2。

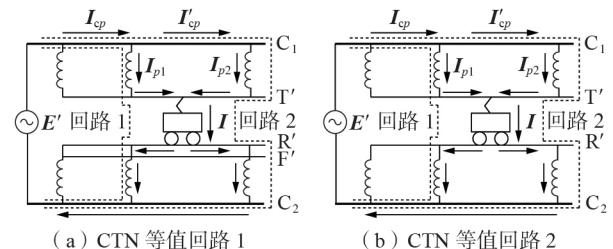


图3 CTN等值回路分析

Fig.3 Analysis of CTN equivalent circuit

将图3(b)进一步简化得到图4所示的等值电路。图中, Z_{TT} 为牵引变压器漏抗; E 为归算至27.5 kV侧后的等值电压; l_p 为机车距离MSS的距离; l_p-D_p 和 D_p 分别为机车位于第 p 座与第 $p+1$ 座牵引变电所之间时长回路和短回路的长度; x_p 为机车位于第 p 座与第 $p+1$ 座牵引变电所之间时距前一变电所的距离。图4中牵引电缆回路归算至27.5 kV牵引侧的单位长度等值阻抗 z_1 和接触网单位长度等值阻抗 z_2 分别见式(3)和式(4)^[10-11]。

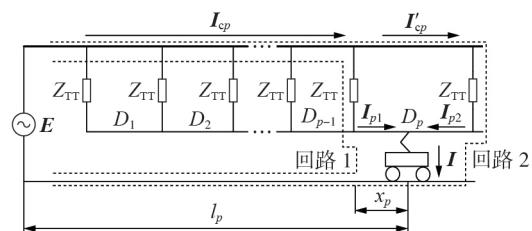


图4 牵引电缆贯通供电系统单车等值模型

Fig.4 Single-vehicle equivalent model of traction cable co-phase connected power supply system

$$\begin{aligned} z_1 &= [R_{C1} + R_{C2} - 2R_{C1C2} + j\omega(L_{C1} + L_{C2} - 2L_{C1C2})]/16 \quad (3) \\ z_2 &= z_{AA} + z_{BB} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, R_{C1} 和 R_{C2} 分别为牵引电缆 C_1 和 C_2 的单位长度电阻; L_{C1} 和 L_{C2} 分别为牵引电缆 C_1 和 C_2 的单位长度电感; R_{C1C2} 和 L_{C1C2} 分别为电缆间的单位长度互电阻和互电感。

对图 4 中机车所在回路列写基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律方程, 可得:

$$\begin{cases} I = I_{p1} + I_{p2} \\ I_{p1}(Z_{TT} + z_2 x_p) = I_{p2}[z_1 D_p + Z_{TT} + z_2(D_p - x_p)] \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)求解得到 I_{p1} 和 I_{p2} 分别为:

$$I_{p1} = \frac{(z_1 + z_2)D_p + Z_{TT} - z_2 x_p}{(z_1 + z_2)D_p + 2Z_{TT}} I = (k_{p1} - k_{p2}x_p)I \quad (6)$$

$$I_{p2} = \frac{Z_{TT} + z_2 x_p}{(z_1 + z_2)D_p + 2Z_{TT}} I = (1 - k_{p1} + k_{p2}x_p)I \quad (7)$$

其中, $k_{p1} = [(z_1 + z_2)D_p + Z_{TT}]/[(z_1 + z_2)D_p + 2Z_{TT}]$; $k_{p2} = z_2/[(z_1 + z_2)D_p + 2Z_{TT}]$ 。

在 CTN 中由长回路电压降落和短回路电压降落构成 CTN 首端至机车所在位置的电压降落 ΔU_1 为:

$$\Delta U_1 = I_{ep} z_1 (l_p - x_p) + I_{p1} (Z_{TT} + z_2 x_p) \quad (8)$$

其中, $I_{ep} = I_0$ 。

将式(6)代入式(8)并化简, 可得:

$$\Delta U_1 = [z_1(l_p - x_p) + (k_{p1} - k_{p2}x_p)(Z_{TT} + z_2 x_p)]I \quad (9)$$

2.2 供电能力

牵引供电系统的供电能力会直接影响线路的运输能力, 受系统阻抗、负荷大小、补偿方式等因素影响^[12-13]。以牵引网的电压损失为约束条件, 以一个供电臂无分相供电区间的供电距离来衡量采用 AT 供电方式的牵引电缆贯通供电系统的供电能力。分析相邻 TT 之间只有 1 辆机车的情形, 若一个供电臂有 n 辆机车, 如图 5 所示, 由 CTN 的阻抗特性知, 全线 n 辆机车的网压均应该满足要求。

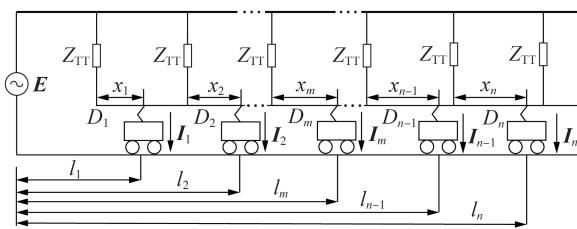


图 5 牵引电缆贯通供电系统多车等值模型

Fig.5 Multi-vehicle equivalent model of traction cable co-phase connected power supply system

为便于分析, 忽略线路的分布电容, 可得末端机车处电压降落 ΔU_n 为:

$$\begin{aligned} \Delta U_n &= \sum_{m=1}^n [l_m - x_m + (1 - k_{m1} + k_{m2}x_m)D_m] z_1 I_m + \\ &\quad \left\{ (1 - k_{n1} + k_{n2}x_n) [Z_{TT} + z_2(D_n - x_n)] \right\} I_n = \\ &\quad \sum_{m=1}^n [l_m - x_m + (Z_{TT}/z_2 + x_m)k_{m2}D_m] z_1 I_m + \\ &\quad \left\{ (Z_{TT}/z_2 + x_n)k_{n2} [Z_{TT} + z_2(D_n - x_n)] \right\} I_n \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $k_{m1} = [(z_1 + z_2)D_m + Z_{TT}]/[(z_1 + z_2)D_m + 2Z_{TT}]$; $k_{m2} = z_2/[(z_1 + z_2)D_m + 2Z_{TT}]$; I_n 和 I_m 分别为第 n 辆和第 m 辆机车的电流; l_m 为第 m 辆机车距离 MSS 的距离; D_m 为第 m 辆机车所在位置短回路长度; x_m 为第 m 辆机车所在位置距前一变电所的距离。

令 $Z_{An} = R_{An} + jX_{An} = [l_m - x_m + (Z_{TT}/z_2 + x_m)k_{m2}D_m] z_1$, $Z_{Bn} = R_{Bn} + jX_{Bn} = (Z_{TT}/z_2 + x_n)k_{n2} [Z_{TT} + z_2(D_n - x_n)]$, 则由式(10)得到末端机车处电压损失 ΔU_n 为^[1]:

$$\begin{aligned} \Delta U_n &= \sum_{m=1}^n (R_{An} \cos \varphi_m + X_{An} \sin \varphi_m) I_m + \\ &\quad (R_{Bn} \cos \varphi_n + X_{Bn} \sin \varphi_n) I_n \end{aligned} \quad (11)$$

其中, φ_m 和 φ_n 分别为第 m 辆和第 n 辆机车的功率因数角; I_m 和 I_n 分别为第 m 辆和第 n 辆机车的电流值大小。

同理, 得第 f ($f < n$) 辆机车处的电压降落 ΔU_f 为:

$$\begin{aligned} \Delta U_f &= (k_{f1} - k_{f2}x_f)(Z_{TT} + z_2 x_f) I_f + \\ &\quad \sum_{m=1}^{f-1} (l_m - x_m) z_1 I_m + \sum_{m=f}^n (l_f - x_f) z_1 I_m + \\ &\quad \sum_{m=1}^{f-1} D_m (1 - k_{m1} + k_{m2}x_m) z_1 I_m \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $k_{f1} = [(z_1 + z_2)D_f + Z_{TT}]/[(z_1 + z_2)D_f + 2Z_{TT}]$; $k_{f2} = z_2/[(z_1 + z_2)D_f + 2Z_{TT}]$; x_f 为第 f 辆机车所在位置距前一变电所的距离; I_f 为第 f 辆机车的电流; l_f 为第 f 辆机车距离 MSS 的距离。

令 $Z_{Af} = R_{Af} + jX_{Af} = (l_f - x_f) z_1$, $Z_{Bf} = R_{Bf} + jX_{Bf} = (k_{f1} - k_{f2}x_f)(Z_{TT} + z_2 x_f) z_1$, $Z_{Cf} = R_{Cf} + jX_{Cf} = (1 - k_{f1} + k_{f2}x_f)D_m z_1$, 则第 f 辆机车处的电压损失 ΔU_f 为:

$$\Delta U_f = \sum_{m=1}^n Z'_{Af} I_m + Z'_{Bf} I_f + \sum_{m=1}^{f-1} Z'_{Cf} I_m \quad (13)$$

其中, $Z'_{Af} = R_{Af} \cos \varphi_m + X_{Af} \sin \varphi_m$; $Z'_{Bf} = R_{Bf} \cos \varphi_f + X_{Bf} \times \sin \varphi_f$, φ_f 为第 f 辆机车的功率因数角; $Z'_{Cf} = R_{Cf} \cos \varphi_m + X_{Cf} \sin \varphi_m$; I_f 为第 f 辆机车的电流值大小。

将式(11)和式(13)作为最远供电距离的判断依据, 设定限值 ε , 其计算流程如图 6 所示。根据图 6 可对 CTN 中的机车电压损失计算, 判断其是否能够满足机车运行规定的最低网压要求, 进而可对重载铁路上牵引电缆贯通供电系统的供电能力进行初步分析。

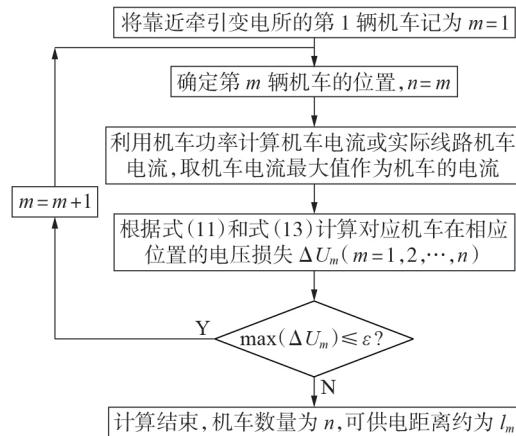


图6 CTN供电距离计算流程图

Fig.6 Flowchart of power supply distance calculation for CTN

3 实例分析

3.1 既有线路情况介绍

以某既有重载线路为例,年运量超 4×10^8 t,全长653 km。该线路为AT供电方式,牵引供电系统如附录A中图A1所示,全线共有16个牵引变电所,外部电源由 A_1 — A_6 这6个供电公司提供。 B_1 — B_{17} 为外部电源接口, C_1 — C_{16} 为牵引变电所。牵引变压器容量从 $(31.5+25)$ MV·A到 (2×80) MV·A不等,牵引所外部电源电压为110 kV,线路运行机车主要为SS4型机车和HXD2型机车,机车平均速度为67.5 km/h。

3.2 改造方案

考虑该实际线路现有外部电源电压为220 kV,为更好地对比既有方案与改造方案,且考虑改造成本因素,该重载线路改造方案外部电源电压等级采用220 kV。根据图6校验后将全线分成2个供电区间,如图7所示。

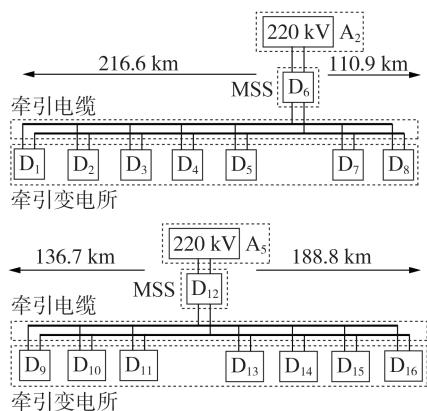


图7 某重载线路牵引供电系统改造方案示意图

Fig.7 Schematic diagram of transformation scheme of traction power supply system of a heavy-haul line

图7中, D_1 — D_8 构成供电区间1(327.5 km),将既有方案中 D_6 变电所作为MSS,外部电源引自既有

方案中 A_2 供电公司,该供电区间其余变电所作为普通牵引变电所; D_9 — D_{16} 构成供电区间2(325.5 km),将既有方案中 D_{12} 变电所作为MSS,外部电源引自既有方案中 A_5 供电公司,该供电区间其他变电所作为普通牵引变电所。在该重载线路既有的AT供电方式的基础上增加双回牵引电缆,电缆互为备用。各供电区间内牵引所接线方式及变压器容量皆不改变,各分区所及牵引所出口处电分相可全部取消。

基于WEBANET仿真软件分别对该线路既有方案及改造方案进行仿真分析,分别验证2种方案全线最低网压是否能够满足机车正常运行,然后再对2种方案的能耗情况进行仿真验证分析。仿真条件如附录A中表A1所示^[11-15]。既有方案与改造方案的上行最低网压和下行最低网压仿真结果分别如附录A中图A2和图A3所示。由图可知,改造方案全线上、下行最低网压分别为23.3、23.9 kV,按我国铁路机车正常运行要求接触网最低网压不低于20 kV的标准来看,改造方案能够满足机车正常运行需求。

3.3 能耗仿真分析

对既有方案和改造方案仿真结果进行能耗统计,分析其能耗情况。该线路既有方案由6个供电公司分别供电,而每个地区公司的电费不一样,因此在做全线运行能耗统计时,以6个地区电力公司为区分进行统计,既有方案单日用电量统计如附录A中表A2所示。改造方案中,全线2个供电区间分别由 A_2 和 A_5 供电公司供电,改造方案单日用电量统计如附录A中表A3所示。基于表A2和表A3计算得到该线路2种方案一年(365天)的用电量分别如附录A中表A4和表A5所示,既有方案和改造方案的年用电量分别为 1.976×10^9 、 1.665×10^9 kW·h,经计算改造方案年用电量可节约 3.110×10^8 kW·h,能耗节约效果明显,其外部电源数目由原方案的17处改为2处,进一步减少了系统损耗,且改造方案潮流分布更加均匀,牵引供电系统的再生制动能量的利用率得到提高进而达到降低能耗的效果。

另外由2种方案年用电量可看出,改造方案更节能,该线路重载方向沿线存在长大下坡道,机车运行过程中制动会产生大量的再生制动能量,牵引电缆贯通供电方案取消各供电区间内电分相,使机车产生的再生制动能量可反馈至接触网系统中供其他机车使用,从而使再生制动能量利用率得到提高,达到节能节电的效果。

4 经济性分析

牵引电缆贯通供电方案能够减少电分相,提升供电能力,增加牵引变压器容量利用率,提高再生制动能量利用率,进而有助于该重载线路运力的提升。

本节将从线路改造投资成本、线路能耗及牵引变压器容量经济效益、线路运输能力提升所产生的经济效益来对改造方案进行经济性分析。

4.1 改造投资成本

4.1.1 MSS 投资

改造方案中MSS投资部分主要包括牵引变压器、同相供电装置和外电投资。该方案中将全线分为2段,每段各设1个MSS,根据附录B中图B1所示的各供电区间负荷情况,并由全天运行情况得出供电区间1和供电区间2的95%概率大值分别为231.29 MW和122.23 MW。

根据文献[1]中计算方法,且考虑1/2备用情况^[1],电压等级为220 kV时,计算MSS变压器及同相供电装置投资成本,使用3台150 MV·A单相变压器,每台价格为 1.5×10^7 元,需要同相供电装置容量为130 MV·A,单价为1.4元/(V·A)^[15],可得投资成本为: $3 \times 1.5 \times 10^7 + 130 \times 10^6 \times 1.4 = 2.27 \times 10^8$ (元)。

该方案中接入2个MSS的为220 kV双回路独立电源,外电投资成本主要与MSS和由断路器、隔离开关、避雷器等构成的电源220 kV间隔以及上级变电站增容投资有关,外部电源投资核算如表1所示。

表1 外部电源改造投资成本

Table 1 Investment cost of external power supply transformation

投资内容	数量	单价/元	合计/元
220 kV间隔	2×2	3.0×10^6	1.2×10^7
上级变电站增容	2	1.0×10^8	2.0×10^8

外部电源架空输电线成本约为 8×10^5 元/km^[16],在本文方案中取架空输电线平均长度为22.5 km,则架空输电线投资总和为: $8 \times 10^5 \times 22.5 \times 2 \times 2 = 7.2 \times 10^7$ (元)。因此可计算得到外部电源总投资 $C = (2 \times 2.27 + 0.12 + 2 + 0.72) \times 10^8 = 7.38 \times 10^8$ (元)。

4.1.2 牵引电缆投资成本

近年来,随着技术的日益成熟和生产工艺的提高,电力电缆的成本已经大幅降低。在改造方案中电缆敷设的一次性投资主要为电缆本身、电缆附件、并联电抗器投资、电缆安装费用、沿线电缆沟和井的修建成本。本方案中选用500 mm²的110 kV交联聚乙烯绝缘电力电缆,电缆单回路设备及安装成本为 1.27×10^6 元/km,回路数为2,长度为614.8 km,沿途电缆沟、井建设成本为 2.45×10^6 元/km,核算该方案的电缆敷设成本投资为:($127 \times 2 \times 614.8 + 245 \times 614.8$) $\times 10^4 = 3.068 \times 10^9$ (元)。

4.1.3 牵引变电所改造投资

在本方案中对沿线牵引变电所改造主要为单相牵引变压器的投资。对于沿线牵引变压器的安装容量及成本计算如表2所示。对于该线路使用牵引电

缆贯通供电方案后,全线仅2个MSS上归电网,因而牵引供电系统与电力系统只有2个接口,对于供电系统与铁路系统都能够减少管理和运营成本。

表2 单相牵引变压器投资成本

Table 2 Investment cost of single-phase traction transformer

单相变压器容量/(MV·A)	数量	单价/元	投资成本/元	合计/元
40	4×2	4.320×10^6	3.456×10^7	
50	4×2	5.400×10^6	4.320×10^7	1.866×10^8
63	8×2	6.800×10^6	1.088×10^8	

4.2 线路能耗及牵引变压器容量经济效益

供电部门对铁路部门收取电费采用“两部制电价”,即同时收取基本电费和电度电费。改造方案中将全线分为2段,每段的牵引负荷功率分别由该段主所集中提供,且在每个MSS安装单相组合式同相供电装置,能够在MSS进行集中治理电能质量问题。

相比既有方案,改造方案大幅降低了牵引变压器的安装容量,提升了变压器容量利用率。改造方案节省的安装容量为: $\Delta S = 1135.5 - 935 = 200.5$ (MV·A);基本电价按平均每月25元/(kV·A)计算,则改造方案可节省基本容量电费(电度电费)为: $\Delta M = 200.5 \times 1000 \times 25 \times 12 = 6.015 \times 10^7$ (元/a)。

根据各地区电度电价计算该重载线路年用电量,计算得到既有方案和改造方案各供电区间电度电费分别如附录B中表B1和表B2所示。经计算,该重载线路牵引电缆贯通供电方案对比既有方案在基本电费上节约 2.11×10^8 元/a。

可见,该重载线路牵引电缆贯通供电方案对比既有方案在基本电费和电度电费上可节省资金约 2.71×10^8 元/a,同时实现了能量的充分利用,也符合我国节能减排的号召。

4.3 线路运输能力提升经济效益

牵引电缆贯通方案可以有效减少牵引网电分相,提高牵引变压器容量利用率,使牵引供电系统供电能力得到提升。重载铁路运输能力的提升主要通过增加单车运量和缩短发车间隔、增加发车对数两方面来提升。

对于增加单车运量,则需要大功率牵引机车及运载能力更高的货车。目前该重载线路机车的编组主要由 1×10^4 t(40%)、 1.5×10^4 t(5%)、 2×10^4 t(55%)组成,可见在增加单车运量方面还有较大提升空间,改造方案使该重载线路牵引供电系统供电能力进一步提升,得以满足开行更多的 2×10^4 t编组列车,大幅增加了该线运输能力。

对于缩短发车间隔、增加每日发车对数,则需要缩短机车运行时间。机车在过电分相时,牵引力和速度都会有损失,改造方案能够取消牵引网中的电

分相环节,使得机车能够安全可靠地运行,缩短运行时间,从而缩短了发车间隔,增加了每日发车对数,进一步提升了该线路运输能力。

若按照目前年运量 4×10^8 t运输能力估算,使用改造方案后,该线路运输能力可达年运量 5.1×10^8 t。若运费按0.1元/(t·km)计算,则该线路每年可产生直接经济效益约为 3.149×10^{10} 元。

5 结论

本文对采用AT供电的重载铁路牵引电缆贯通供电方案进行了研究。对CTN等值阻抗、电流分布、电压损失、CTN末端网压等电气参数的数学模型进行推导,进而得出供电距离的计算方法,以判断该方案供电能力。

基于等值模型和计算方法,以某实际重载线路改造方案为例,分别对该线路既有方案及改造方案进行了供电能力仿真和线路能耗仿真分析。分析结果验证了改造方案的可行性,节能省电效果明显。同时改造方案电分相大幅减少,供电能力提高,供电距离延长,使机车运行更加安全可靠,运行速度得到提升。

对改造方案的一次性投资、能耗经济效益、运量提升经济效益分析表明,改造方案能够减少年用电费用,降低运营维护成本。同时随着机车运行速度的提升,线路年运量增加,增加了直接经济效益。牵引电缆贯通供电系统的供电优越性及其经济性有利于该方案在铁路牵引供电系统的应用和推广。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4):559-568.
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4):559-568.
- [2] 吴凤娟. 重载铁路牵引供电系统改造方案浅析[J]. 铁道标准设计, 2005(12):85-88.
WU Fengjuan. Analysis on the improvement scheme of the traction power supply system in heavy-haul railways[J]. Railway Standard Design, 2005(12):85-88.
- [3] 柴峰,张金胜. 大秦线4亿t牵引供电改造方案浅析[J]. 电气化铁道, 2009(4):18-19,23.
- [4] 魏传元,曹晓斌. 重载铁路牵引负荷对变电所功率因数的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2013(9):100-103.
WEI Chouyuan, CAO Xiaobin. Influence of traction load of heavy haul railway on power factor of substation[J]. Railway Standard Design, 2013(9):100-103.
- [5] 黄小红,李群湛,解绍锋. 一种改善同相牵引供电系统直流侧电压及补偿容量的方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2):85-90.
HUANG Xiaohong, LI Qunzhan, XIE Shaofeng. Improvement scheme for DC link voltage and compensation capacity of co-phase traction power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2):85-90.
- [6] 王果,常文寰,Claus Leth Bak,等. 基于无谐波检测和选择性谐波补偿原理的组合式同相供电系统控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12):130-137.
WANG Guo, CHANG Wenhuan, Claus Leth Bak, et al. Control strategy of combined co-phase power supply system based on theory of control without harmonic detection and selective harmonic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):130-137.
- [7] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2):199-207.
LI Qunzhan. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(2):199-207.
- [8] 郭鑫鑫,李群湛,解绍锋,等. 电气化铁路高压电缆牵引网电气特性研究[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12):132-137.
GUO Xinxin, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Electrical characteristic of cable traction network for electrified railway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):132-137.
- [9] 周婷,解绍锋. 电气化铁路新型电缆供电方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7):189-195,206.
ZHOU Ting, XIE Shaofeng. New-type cable traction power supply scheme of electric railroad[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7):189-195,206.
- [10] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2007:107-127.
- [11] 李群湛,易东,贺建闽. 交流电气化铁路牵引电缆供电分析[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1):81-87.
LI Qunzhan, YI Dong, HE Jianmin. Power supply capacity of traction cable for AC electrified railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1):81-87.
- [12] 王辉,易东,郭鑫鑫,等. 电缆牵引供电系统工频过电压传播特性研究[J]. 电气化铁道, 2016(1):1-5.
- [13] 夏焰坤,李群湛,解绍锋,等. 高速和重载电气化铁路V型接线牵引变压器负序补偿研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2):73-78.
XIA Yankun, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Negative sequence compensation of high-speed and heavy-haul electric railroad with V-connection transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2):73-78.
- [14] GUO Xinxin, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Modeling and capacitance effect analysis of the cable traction network of an electrified railway[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F:Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(8):1803-1811.
- [15] 周强. 电气化铁路新型电缆供电技术经济性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
ZHOU Qiang. Study on the technical and economic character of cable-powered electric railway[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2015.

作者简介:



张 恒

张 恒(1993—),男,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向为牵引供电系统理论(**E-mail**: swjtu.zhangheng@qq.com);

王 辉(1989—),男,河北张家口人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为牵引供电系统理论、电能质量分析与控制(**E-mail**: wanghuiswjt@163.com);

李群湛(1957—),男,河北元氏人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为牵引供电系统理论、电能质量分析与控制(**E-mail**: lqz3431@263.net)。

(编辑 李莉)

Power supply scheme of traction cable co-phase connected power supply system for heavy-haul railway powered by AT

ZHANG Heng¹, WANG Hui¹, LI Qunzhan¹, XIA Mengyi², ZHANG Yu¹, SU Peng¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Electrification Department, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Aiming at heavy-haul railways powered by AT(AutoTransformer), in order to further improve its capacity and the utilization rate of regenerative braking energy, a power supply scheme of heavy-haul railway traction cable co-phase connected power supply system powered by AT is proposed. Firstly, the proposed power supply scheme is introduced. Secondly, the power supply ability of the power supply system is studied, the equivalent model of the power supply system is established, the current distribution of the power supply system is analyzed, the equivalent impedance of traction network is calculated, and the mathematical model of power supply ability is deduced according to its voltage distribution relationship, which provides basis for the preliminary design of the scheme. Then, taking the transformation design of an actual heavy-haul line as a case, the power supply ability and energy consumption of the existing scheme and the proposed scheme are simulated and verified. Finally, the transformation cost and operation economy are analyzed. The analysis results show that the proposed scheme can extend the power supply distance, reduce the energy consumption of traction power supply system, improve the utilization rate of regenerative braking energy, and save external power resources, having good economic benefit.

Key words: heavy-haul railway; AT power supply; traction cable co-phase connected power supply; power supply ability; regenerative braking energy; economic analysis

(上接第 191 页 continued from page 191)

Regulation principle of power flow gradient to multiple characteristic independent variables in UPFC embedded power system

LIU Jinlian¹, XU Zheng¹, YANG Jian¹, ZHANG Zheren¹, SONG Pengcheng²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. National Power Dispatching and Control Center, State Grid Corporation of China, Beijing 100032, China)

Abstract: The power flow gradient or regulation efficiency of UPFC(Unified Power Flow Controller) embedded power system are mainly dominated by the amplitude and phase angle of OSIV(Output Series Inserted Voltage) of UPFC and the phase difference of system. The above three variables are chosen as CIVs(Characteristic Independent Variables) for power flow regulation, and with the actual circuit of UPFC embedded double-end power system as background, the mathematical models of active and reactive power flow gradient for each CIV at different critical points are deduced. Based on the regulation freedom degree and efficiency of system power flow, the regulation characteristics of power flow gradients are analyzed theoretically. A variety of typical system operation conditions are set up, and two types of power flow regulation modes are designed through two types of incremental combinations of OSIV amplitude and phase angle, and several typical regulation scenarios for the phase difference of system are also designed. Finally, the case test and analysis are performed regarding the characteristics of power flow gradients to each CIV at system critical points, and the summarized conclusions are beneficial to coordinate the power flow regulation efficiency and the requirements of system protection and stability comprehensively, making the operation of power grid efficient and stable.

Key words: unified power flow controller; output series inserted voltage; power flow gradient; characteristic independent variables; critical points; system operation conditions

附录 A

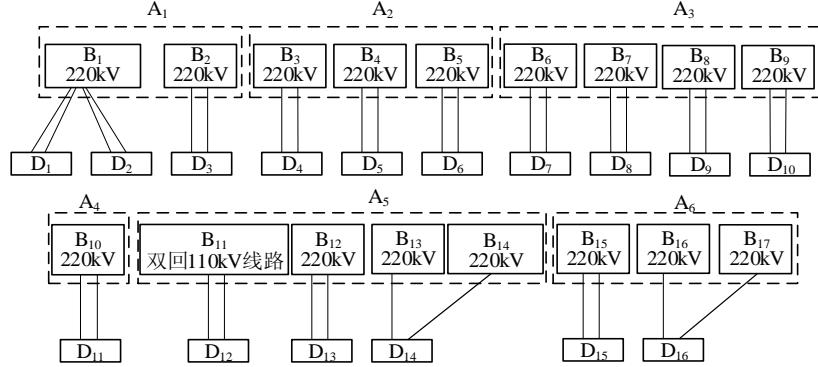


图 A1 某重载线路牵引供电系统既有方案示意图

Fig.A1 Schematic diagram of existing scheme of traction power supply system of a heavy load line

表 A1 既有方案和改造方案的能耗仿真条件

Table A1 Simulation conditions of energy consumption of existing scheme and reconstruction scheme

参数	既有方案	改造方案
机车类型	HXD2	HXD2
编组方式	3M210T	3M210T
供电方式	AT 供电	牵引电缆贯通供电方式
是否上下行并联	是	是
单列编组载荷/t	20 000(下行) 4 500(上行)	20 000(下行) 4 500(上行)
发车间隔/min	21	21
天窗时间/h	4	4
每日发车对数/对	55	55
年运量/t	4.015×10^8	4.015×10^8
列车运行速度/km/h	75	75
功率因数	0.98	0.98

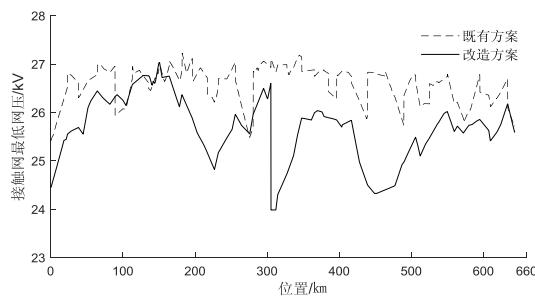


图 A2 既有方案与改造方案的上行最低网压

Fig.A2 Uplink minimum network pressure of existing scheme and transformation scheme

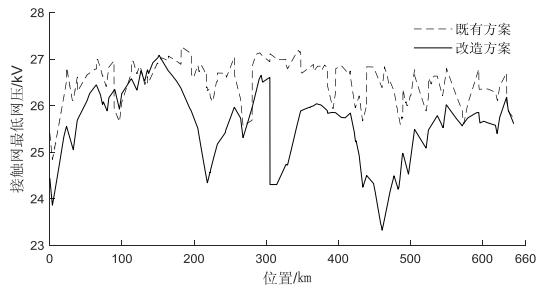


图 A3 既有方案与改造方案的下行最低网压

Fig.A3 Downlink minimum network pressure of existing scheme and transformation scheme

表 A2 既有方案单日用电量统计

Table A2 Daily electricity consumption statistics under existing scheme

序号	供电公司	用电量/(kW h)
1	A ₁	1.121×10^6
2	A ₂	5.350×10^5
3	A ₃	1.176×10^6
4	A ₄	4.970×10^5
5	A ₅	1.500×10^6
6	A ₆	5.860×10^5

表 A3 改造方案单日用电量统计

Table A3 Daily electricity consumption statistics under transformation scheme

序号	供电公司	用电量/(kW h)
1	A ₂	1.570×10^6
2	A ₅	2.991×10^6

表 A4 既有方案年用电量统计

Table A4 Annual electricity consumption statistics under existing scheme

供电公司	年用电量/(kW h)	总和/(kW h)
A ₁	4.091×10^8	
A ₂	1.951×10^8	
A ₃	4.293×10^8	
A ₄	1.813×10^8	1.976×10^9
A ₅	5.475×10^8	
A ₆	2.139×10^8	

表 A5 改造方案年用电量统计

Table A5 Annual electricity consumption statistics under transformation scheme

供电公司	年用电量/(kW h)	总和/(kW h)
A ₂	5.730×10^8	
A ₅	1.092×10^9	1.665×10^9

附录 B

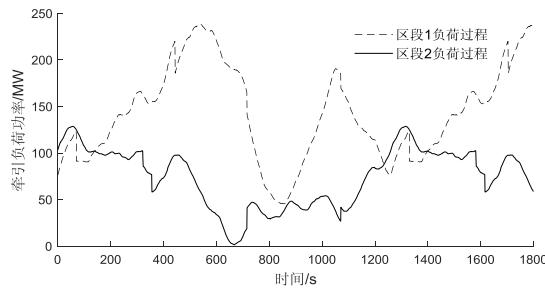


图 B1 各供电区间负荷曲线

Fig.B1 Load curve of each section

表 B1 既有方案各供电区间电度电费

Table B1 Electricity rates of each segment under existing scheme

供电公司	年用电费用/元	合计/元
A ₁	1.840×10^8	
A ₂	9.800×10^7	
A ₃	2.650×10^8	
A ₄	1.170×10^8	1.046×10^9
A ₅	2.750×10^8	
A ₆	1.070×10^8	

表 B2 改造方案各供电区间电度电费

Table B2 Electricity rates of each segment under transformation scheme

供电公司	年用电费用/元	合计/元
A ₂	2.870×10^8	
A ₅	5.480×10^8	8.350×10^8