

电气化铁路新型电缆供电方案

周 婷,解绍锋

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:电分相和电能质量问题是制约我国高速铁路发展的主要技术问题,为了适应高速铁路发展的需要,可采用新型电缆供电方式。在考虑电缆间耦合作用的基础上,计算了单相电缆的电气参数。基于电缆牵引网等值电路推导了单、复线电缆牵引网的电流分配规律与等效阻抗。以实际线路为例完成了新型电缆供电方案的设计,确定了主变电所容量、牵引变压器容量和各区段的电缆选型,并就所提方案进行了可行性验证和经济性分析。仿真结果表明,所提新型电缆供电方案在空载和负载条件下,电缆和接触网的电压水平均在相应的电压允许范围内,满足牵引供电需求;与已有牵引供电方案相比,新型电缆供电方案具有较明显的经济效益。

关键词:电气化铁路;电缆供电方式;电气参数;电流分配规律;阻抗特性;方案设计;经济性分析;电能质量

中图分类号:U 224.8

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.026

0 引言

近年来,随着大批高速铁路的建设规划,我国电气化铁路进入了蓬勃发展的时期。根据国务院新批准的《中长期铁路网规划》,到 2020 年,中国高速铁路规模将达到 3×10^4 km;到 2025 年,中国高速铁路规模将达到 3.8×10^4 km 左右;远期将达到 4.5×10^4 km 左右。截至 2016 年 9 月,我国投入运营的高速铁路总运营里程已超过 2×10^4 km。我国高速铁路的飞速发展对我国电气化铁路牵引供电系统提出了越来越高的要求。

电气化铁路普遍采用工频单相交流电为牵引负荷供电^[1]。为了减小单相牵引负荷对三相公用电网产生的负序影响,铁路供电采用换相连接,在分相分区处的相邻供电区间加装电分相装置。电分相会造成供电中断,制约高速铁路列车速度的进一步提高,同时电分相也是机械上的薄弱点,影响牵引供电设备的安全可靠运行^[2]。

同相供电和双边供电结合使用可大幅减少供电系统中的电分相,是目前解决电分相的最佳方案之一^[3]。其中,同相供电技术可取消牵引变电所出口处的电分相、治理负序,解决存在的电能质量问题,同时,双边供电技术可取消分区所处的电分相,但需要电力系统和牵引供电系统的配合才能实现,方案

存在一定的局限性。

文献[4]提出了一种新型电缆供电方式。新型电缆供电方式的供电距离和电压水平主要由电缆决定,电缆供电能力强,供电距离长,可大幅减少线路中电分相的存在。本文将研究单相电缆电气参数的计算方法,并推导单、复线电缆牵引网(CTN)的电流分配规律与等效阻抗,通过实例设计对新型电缆供电方案的电压水平和经济效益进行分析。

1 新型电缆供电方式结构

新型电缆供电系统由主变电所(MSS)和电缆牵引网组成,如图 1 所示。该供电方式的电缆牵引网包括电力电缆(C_1 和 C_2)、牵引变压器(TT)、接触线(T)和钢轨(R)。电力电缆选择 110 kV 电压等级,沿铁路沿线埋设或沿电缆沟与接触网平行架设。牵引变压器采用单相接线,按一定间隔沿线分布,连接电缆和接触网,实现电压等级转换和电能传输。

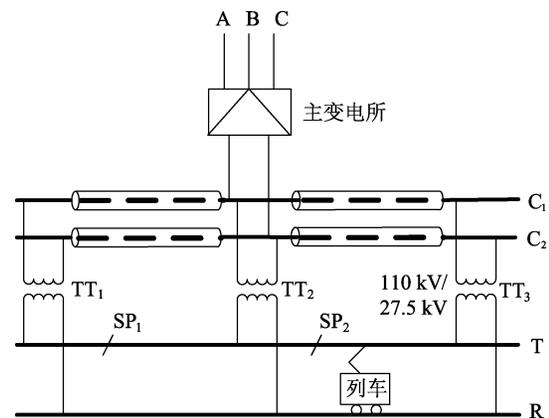


图 1 新型电缆供电系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of new-type cable traction power supply system

主变电所采用主变压器(MTT)和同相补偿装置

收稿日期:2017-03-05;修回日期:2018-01-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307143);中国铁路总公司“电气化铁路贯通同相供电与运用技术研究”重点科技项目(2015J005-A);温州市域铁路 S1 线同相供电项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307143), the Key Science and Technology Project of China Railway Corporation about Study on Co-phase Power Supply and Application Technology of Electrified Railway (2015J005-A) and the Project of Wenzhou Railway S1 Co-phase Power Supply

(CPD)组合供电^[5],减少变电所出口处的电分相并实现电能质量问题的治理,如图2所示。同相补偿装置由高压匹配变压器(HMT)、交直交变频器(ADA)、牵引匹配变压器(TMT)等组成。BB₁、BB₂为主牵引母线。

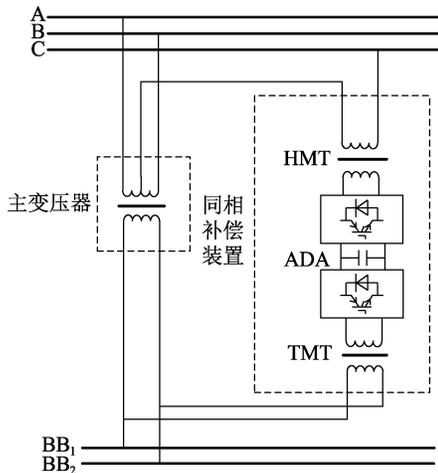


图2 主变电所接线示意图

Fig.2 Connection diagram of main substation

2 电缆电气参数

2.1 电缆概况

在分析新型电缆供电系统的特性时,需要对电缆电气参数进行计算。通常电缆参数通过查找手册得到,但新型电缆供电方案中采用单相电缆,与电力系统中的三相电缆电气参数的计算有所区别,且电缆结构和接地方式不同对线路参数的影响较大,查找得到的电缆参数并不完全准确,因此有必要根据电缆的基本参数计算单相电缆的电气参数。

选取电缆型号为YJLW02-64/110的3种不同截面积的电缆进行研究,其主要结构尺寸如表1所示。新型电缆供电系统中的电缆线路为单相回路,电缆结构和排列方式如图3所示。

表1 110 kV 电缆基本参数

Table 1 Basic parameters of 110 kV cable

截面积/mm ²	线芯近似直径/mm	内绝缘层厚度/mm	金属护套厚度/mm	外绝缘层厚度/mm
400	23.8	17.5	2	4.0
500	26.6	17.0	2	4.0
630	30.1	16.5	2	4.5

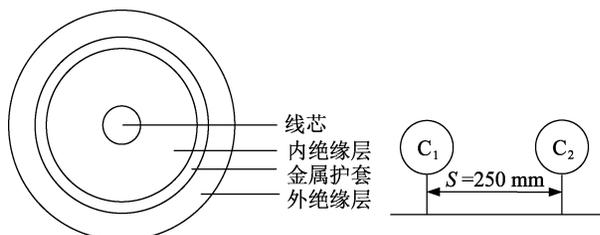


图3 电缆结构和排列方式

Fig.3 Structure and laying method of cable

2.2 电缆电气参数计算

新型电缆供电系统的电缆线路由若干单元组成,如图4所示。电缆金属护套的接地方式对电缆电气参数有一定的影响,考虑电缆线路需满足长距离供电需求,将每个电缆单元分成2段或2的倍数段,选择金属护套交叉互联的接地方式,见图5。

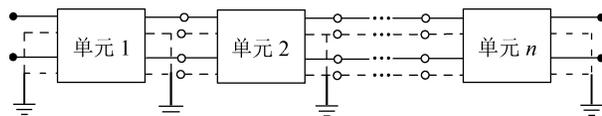


图4 多单元的电缆线路模型

Fig.4 Model of cable line consisting of several units

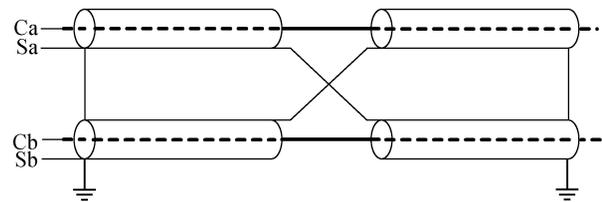


图5 电缆金属护套交叉互联的接地方式

Fig.5 Cross-connection grounding mode of metal sheath for cable

将金属护套与线芯同等处理,则电缆单元的每一段均可视为4根各以大地为回路的金属导线,其中,2根为电缆C₁、C₂的线芯Ca、Cb,另2根为电缆金属护套Sa、Sb。电缆线芯单位长度的自阻抗z_{CC}、电缆金属护套单位长度的自阻抗z_{SS}为^[6-8]:

$$z_{CC} = r_{CC} + \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \ln(D_e/R_C) \quad (1)$$

$$z_{SS} = r_{SS} + \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \ln(D_e/R_S) \quad (2)$$

电缆线芯与同相金属护套间单位长度的互阻抗z_{CS}为:

$$z_{CS} = \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \ln(2D_e/R_S) \quad (3)$$

电缆线芯与不同相金属护套间单位长度的互阻抗z_{CS1}为:

$$z_{CS1} = \pi^2 \times 10^{-4} f + j4\pi \times 10^{-4} f \ln(2D_e/D) \quad (4)$$

其中,r_{CC}为单位长度线芯的交流电阻;r_{SS}为单位长度金属护套的交流电阻;f为频率;R_C为线芯的几何平均半径;R_S为金属护套的几何平均半径;D_e = 660 × √(ρ_e/f)为以大地为回路时等值回路的深度,ρ_e为土壤的电阻率;D为电缆间的距离。当电缆间的距离远大于线芯和同相金属护套间的距离时,电缆线芯之间的互阻抗和电缆金属护套间的互阻抗均为式(4)^[6,9]。

表2为电缆线路阻抗参数计算结果,电缆间的耦合作用体现在不同电缆线芯间的互阻抗、金属护套间的互阻抗以及电缆线芯与另一电缆金属护套的互阻抗上。线芯、金属护套之间单位长度的电容C_{CS}和金属护套、大地之间单位长度的电容C_{SE}分别为:

$$C_{CS} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{cs}}{\ln(d_{oa}/d_{ia})} \quad (5)$$

$$C_{SE} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{se}}{\ln(d_{ob}/d_{ib})} \quad (6)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_{cs} 、 ϵ_{se} 分别为内绝缘层和外绝缘层的相对介电常数; d_{ia} 、 d_{oa} 分别为内绝缘层的内、外半径; d_{ib} 、 d_{ob} 分别为外绝缘层的内、外半径。

表 2 电缆阻抗参数

截面积/ mm ²	$z_{CC}/$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	$z_{SS}/$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	$z_{CS}/$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	$z_{CS1}/$ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)
400	0.108 9+ j0.707 5	0.144 2+ j0.647 9	0.049 3+ j0.647 9	0.049 3+ j0.516 3
500	0.096 4+ j0.700 5	0.141 4+ j0.646 1	0.049 3+ j0.646 1	0.049 3+ j0.516 3
630	0.086 6+ j0.692 8	0.137 9+ j0.643 7	0.049 3+ j0.643 7	0.049 3+ j0.516 3

电缆线路的电容参数与电缆的排列方式和电缆间的耦合作用均无关。根据式(5)、(6)得到的计算结果如表 3 所示。

表 3 电缆电容参数

截面积/mm ²	$C_{CS}/(\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	$C_{SE}/(\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$
400	$1.537 0 \times 10^{-7}$	$1.066 6 \times 10^{-6}$
500	$1.688 3 \times 10^{-7}$	$1.095 4 \times 10^{-6}$
630	$1.878 1 \times 10^{-7}$	$1.016 1 \times 10^{-6}$

电导 G 通常用介质损耗系数 $\tan \delta$ 表示,线芯和金属护套之间单位长度的电导 G_{CS} 和金属护套与大地之间单位长度的电导 G_{SE} 分别为:

$$G_{CS} = \omega C_{CS} \tan \delta_{cs} \quad (7)$$

$$G_{SE} = \omega C_{SE} \tan \delta_{se} \quad (8)$$

其中, δ_{cs} 、 δ_{se} 分别为内、外绝缘层的损耗因子。

3 电缆牵引网模型理论推导

新型电缆供电系统的电缆牵引网包含电缆线路、牵引变压器、接触网和钢轨 4 个部分,且同时存在 2 种电压等级,结构复杂。为了在保证精度的前提下简化计算,将电缆回路等效后归算到接触网回路侧,并将接触网和钢轨回路的参数等效,得到如图 6 所示的电缆牵引网等值电路图^[4]。

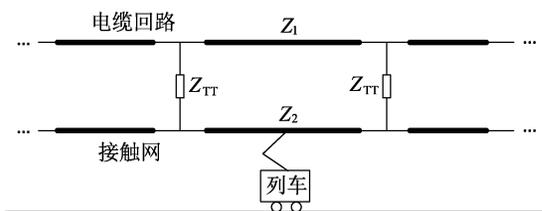


图 6 电缆牵引网等值电路

Fig.6 Equivalent circuit of CTN

图 6 中, Z_{TT} 为牵引变压器的等值漏抗; Z_1 为将电缆回路归算到接触网回路侧的等值阻抗,如式(9)所示; Z_2 为接触网和钢轨回路的等值自阻抗,如式(10)所示。

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 = [(R_{C1} + R_{C2} - 2R_{C1C2}) + j\omega(L_{C1} + L_{C2} - 2L_{C1C2})] / 16 \quad (9)$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 = (R_F + R_R - 2R_{FR}) + j\omega(L_F + L_R - 2L_{FR}) \quad (10)$$

其中, R_{C1} 、 R_{C2} 、 R_F 、 R_R 分别为电缆 C_1 、电缆 C_2 、接触网和钢轨的电阻; L_{C1} 、 L_{C2} 、 L_F 、 L_R 分别为电缆 C_1 、电缆 C_2 、接触网和钢轨的电感; R_{C1C2} 、 L_{C1C2} 和 R_{FR} 、 L_{FR} 分别为电缆 C_1 与 C_2 之间和接触网与钢轨之间的电阻、电感。

3.1 电流分配规律

将列车所在的两牵引变压器及其之间的电缆回路和接触网称为短回路,短回路到主变电所的电缆回路及其平行的接触网和钢轨回路称为长回路。短回路的接触网主要负责本段列车的供电任务,而长回路的电缆回路将负责整个电缆牵引网的供电任务^[10]。短回路中,列车主要向相邻 2 台牵引变压器取流。在图 7 所示单线电缆牵引网电流分布中, I 为列车的等效电流; I_1 、 I_2 为通过短回路中两牵引变压器的电流; I_{C1} 、 I'_{C1} 分别为长回路和短回路内流经电缆回路归算到接触网回路侧的电流; L 、 l 分别为长回路和短回路的长度; x 为列车距短回路中靠近主变电所牵引变压器的距离。在归算后发现接触网回路的阻抗值远大于电缆回路的阻抗值,长回路中的接触网回路分流较少,在忽视电缆对地电容产生的容性电流的条件下,可假设 $I_{C1} = I$ 、 $I'_{C1} = I_2$ 。

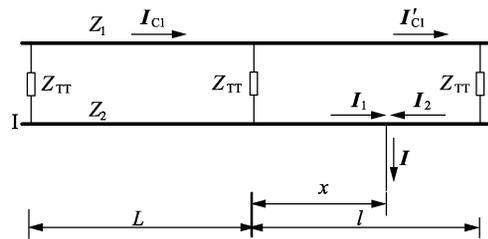


图 7 单线电缆牵引网电流分布示意图

Fig.7 Schematic diagram of current distribution in single CTN

单线电缆牵引网的电流分配规律为^[11]:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{Z_1 l + Z_{TT} + Z_2(l-x)}{Z_1 l + 2Z_{TT} + Z_2 l} I \\ I_2 = \frac{Z_{TT} + Z_2 x}{Z_1 l + 2Z_{TT} + Z_2 l} I \end{cases} \quad (11)$$

对于复线电缆牵引网而言,其上下行牵引网之间单位长度等值互阻抗为:

$$Z_m = R_m + j\omega L_m = (R_{F1F2} + R_{R1R2} - 2R_{F1R2}) + j\omega(L_{F1F2} + L_{R1R2} - 2L_{F1R2}) \quad (12)$$

其中, R_{F1F2} 与 L_{F1F2} 、 R_{R1R2} 与 L_{R1R2} 、 R_{F1R2} 与 L_{F1R2} 分别为

上下行接触网之间、上下行钢轨之间以及上行接触网和下行钢轨之间的电阻与电感。

复线电缆牵引网电流分布示意图如图8所示。图中, I_1 、 I_{II} 分别为上、下行列车的等效电流; I_a 和 I_b 、 I_c 和 I_d 分别为上、下行列车通过短回路中两牵引变压器获得的归算到接触网回路侧的电流; I_{C2} 、 I'_{C2} 分别为长回路和短回路内流经电缆回路的归算到接触网回路侧的电流; x_1 、 x_2 分别为上、下行列车距短回路中靠近主变电所牵引变压器的距离。假定 $I_{C2} = I_1 + I_{II}$ 、 $I'_{C2} = I_b + I_d$, 根据电流和电压的关系可列出式(13)。

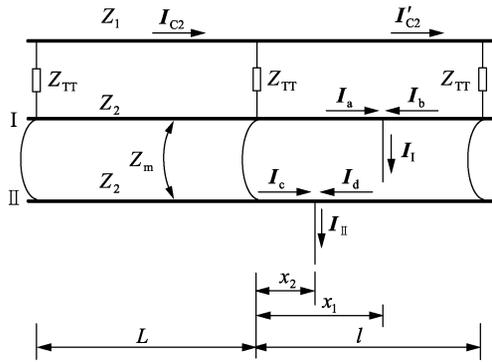


图8 复线电缆牵引网电流分布示意图

Fig.8 Schematic diagram of current distribution in double CTN

$$\begin{cases} Z_{TT}(I_a + I_c) + Z_2 x_1 I_a + Z_m x_2 I_c - Z_m(x_1 - x_2) I_d = \\ Z_{TT}(I_b + I_d) + Z_1 l(I_b + I_d) + \\ Z_2(l - x_1) I_b + Z_m(l - x_1) I_d \\ Z_2 x_1 I_a + Z_m x_2 I_c - Z_m(x_1 - x_2) I_d - Z_2(l - x_1) I_b - \\ Z_m(l - x_1) I_d = Z_2 x_2 I_c + Z_m x_2 I_a - Z_2(l - x_2) I_d + \\ Z_m(x_1 - x_2) I_a - Z_m(l - x_1) I_b \\ I_a + I_b = I_1 \\ I_c + I_d = I_{II} \end{cases} \quad (13)$$

整理得:

$$\begin{cases} I_a = Z_{AA} I_1 + Z_{BB} I_{II} \\ I_b = (1 - Z_{AA}) I_1 - Z_{BB} I_{II} \\ I_c = Z_{CC} I_1 + Z_{DD} I_{II} \\ I_d = -Z_{CC} I_1 + (1 - Z_{DD}) I_{II} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} Z_{AA} = \frac{(Z_1 l + Z_{TT})(2l - x_1) + [(Z_2 + Z_m)l + Z_{TT}](l - x_1)}{(2Z_1 + Z_2 + Z_m)l^2 + 4Z_{TT}l} \\ Z_{BB} = \frac{Z_{TT}(x_2 - l) + (Z_1 l + Z_{TT})x_2}{(2Z_1 + Z_2 + Z_m)l^2 + 4Z_{TT}l} \\ Z_{CC} = \frac{Z_{TT}(x_1 - l) + (Z_1 l + Z_{TT})x_1}{(2Z_1 + Z_2 + Z_m)l^2 + 4Z_{TT}l} \\ Z_{DD} = \frac{(Z_1 l + Z_{TT})(2l - x_2) + [(Z_2 + Z_m)l + Z_{TT}](l - x_2)}{(2Z_1 + Z_2 + Z_m)l^2 + 4Z_{TT}l} \end{cases} \quad (15)$$

3.2 等效阻抗

根据图7得单线电缆牵引网的等效阻抗为:

$$Z = \frac{\Delta U}{I} = Z_1 L + (Z_{TT} + Z_2 x) \frac{Z_1 l + Z_{TT} + Z_2(l - x)}{Z_1 l + 2Z_{TT} + Z_2 l} \quad (16)$$

在复线电缆牵引网中,上下行牵引网单位等效阻抗为^[12]:

$$Z'_2 = (Z_2 + Z_m) / 2 \quad (17)$$

假设图8中 $I_{II} = 0$, 则同理可得复线电缆牵引网的等效阻抗为:

$$Z' = \frac{\Delta U_1}{I_1} = Z_1 L + (Z_{TT} + Z'_2 x_1) \frac{Z_1 l + Z_{TT} + Z'_2(l - x_1)}{Z_1 l + 2Z_{TT} + Z'_2 l} \quad (18)$$

图9为电缆牵引网阻抗特性曲线示意图。新型电缆供电系统单、复线电缆牵引网等效阻抗的变化趋势一致,均呈马鞍形变化,复线电缆牵引网的阻抗小于单线电缆牵引网的阻抗。由于电缆回路的等效阻抗很小,在计算电缆牵引网等效阻抗时需要考虑牵引变压器漏抗,因此电缆牵引网阻抗在牵引变压器处($S=0, l, 2l, 3l$)产生跳变^[11]。

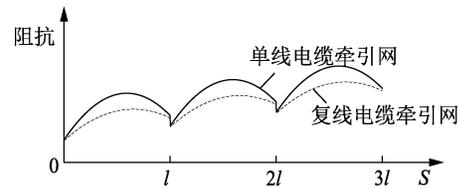


图9 电缆牵引网的阻抗特性曲线

Fig.9 Impedance characteristic curve of CTN

4 实例设计

本节以某实际线路为例完成新型电缆供电方案设计。该实际线路为开行重载单元列车的双线电气化铁路,线路全长 653 km,原供电方案共有 16 个牵引变电所,采用斯科特接线和交叉交叉接线方式。2015 年该线路共完成 3.97×10^8 t 运量,平均每天完成 1.088×10^6 t。列车开行方案如表4所示,列车平均速度为 80 km/h,平均发车间隔为 16.3 min^[13]。

表4 日均开行列车情况

Table 4 Condition of daily running trains

牵引运量/t	日均开行列车数/列	空车平均取电电流/A	重车平均取电电流/A
2.0×10^4	48.6	600	1 000
1.5×10^4	4.8	450	750
1.0×10^4	35	300	500

4.1 主变电所容量设计

采用新型电缆供电方案后,主变电所承担全线供电任务,其安装容量由全线最大牵引负荷决定。

根据线路负荷情况和既有变压器设备的实际安装状况,全线共设置 2 个主变电所,且主变电所的供电臂间互不贯通,分别为各自范围内运行的列车供电。线路的外部电源情况如表5所示。

正常运行时,计算得到上下行列列车平均带电量

表 5 220 kV 外部电源参数

Table 5 Parameters of 220 kV external power source

运行方式	短路容量/ (MV·A)	三相电压不平衡 度限值/%	负序容量允许值/ (MV·A)
正常运行	5 000	1.3	65
紧密运行	5 000	2.6	130

流为 630 A;紧密运行时,将主变电所供电区段内所有列车运量全部提升至 20 000 t 并以 16.3 min 为间隔依次发车作为短时最大负荷的计算条件,主变压器的过负荷系数 $k_T = 1.5$ 。在列车正常运行和紧密运行条件下分别得到主变电所的计算容量和校核容量。为了保证系统运行的可靠性,备用方式采取 100% 备用。根据文献[3]的方法进行计算,得到主变电所容量如表 6 所示。

表 6 主变电所容量

Table 6 Capacity of main substation

MV·A				
主变电所	设备	计算容量	校核容量	安装容量
A	主变压器	213.5	238	4×120
	同相补偿装置	148.5	227.5	2×230
B	主变压器	209	235	4×120
	同相补偿装置	144	222.5	2×225

4.2 牵引变压器容量设计

为了方便对比和计算,新型电缆供电方案中牵引变压器的位置与原牵引变电所的位置一致。牵引变压器的过负荷系数 $k_T = 1.75$,其他条件与 4.1 节相同。牵引变压器 1、2 分别为距离主变电所 A 和主变电所 B 最近的牵引变压器。

变压器按安装容量分为不同等级,如 40 MV·A、50 MV·A、63 MV·A 和 75 MV·A 等。根据表 7 所示牵引变压器的容量数据,与原供电方案中相同位置处的牵引变电所安装容量相比,采用新型电缆供电方案后,牵引变压器 1 和牵引变压器 2 的安装容量降低了 2 个等级,牵引变压器的容量利用率得到了提高。

表 7 牵引变压器容量

Table 7 Capacity of traction transformers

牵引变压器	计算容量/ (MV·A)	校核容量/ (MV·A)	安装容量/ (MV·A)	原安装容量/ (MV·A)
1	31.08	39.16	40	63
2	39.44	49.69	50	75

4.3 电缆选型

电缆的种类繁多,其敷设环境和接地方式均会对电缆的载流量造成影响。新型电缆供电方式属于长距离供电,电缆承担着主要的供电任务,且越靠近主变电所,电缆承载的电流值越大,故对各区段电缆需承载的电流值进行分段计算。

新型电缆供电系统中牵引变压器设置在原牵引变电所处,根据相邻变电所的位置设置电缆区段,相邻牵引变压器间的距离为各电缆区段的长度。根据

不同电缆型号下电缆的载流量大小^[14],结合牵引变电所区段的电流情况,考虑到检修和施工方便,本文新型电缆供电方案选择 YJLW02-64/110 交联聚乙烯电缆,每个电缆区段增加一根电缆备用,具体选用情况如表 8 所示。

表 8 电缆参数

Table 8 Parameters of cable

区段	截面积/ mm ²	长度/ km	回数	区段	截面积/ mm ²	长度/ km	回数
1	400	41.3	1	8	400	36.4	1
2	400	48.2	2	9	400	32.0	2
3	500	37.1	2	10	500	47.4	2
4	630	32.3	2	11	630	42.2	2
5	500	34.4	2	12	500	43.7	2
6	400	39.8	2	13	400	44.9	2
7	400	48.8	1	14	400	38.6	1

4.4 方案可行性分析

为了保证列车正常运行,牵引网供电电压应保证在 19~29 kV 范围内。此外,国标 GB/T 11017 规定 110 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆的最大运行电压为 126 kV。本节以主变电所 A 的供电范围为例进行仿真验证。

图 10 为空载条件下电缆线路的电压分布情况,点 A 为该区间的主变电所位置。由于电缆线路具有电容效应,空载时电缆牵引网电压较高,主变电所中的漏抗使电缆线路的电容效应更加明显。在负载运行条件下,电容效应有利于电缆牵引网供电能力的提高,因此采用在线路中加装可控补偿装置进行调节。补偿系数为:

$$k = \frac{Q_L}{Q_C} = \frac{U_c^2 / X_L}{U_c^2 B} \quad (19)$$

其中, U_c 为线路额定电压; B 为补偿区段电缆总电纳; X_L 为并联电抗。

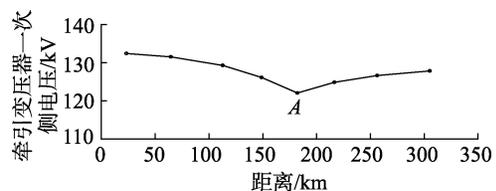


图 10 无补偿时的电缆牵引网空载电压

Fig.10 No-load voltage of CTN without compensation

通常补偿系数越大,电缆牵引网电压抬升越小^[11,15]。本文采用分散补偿方案,在各牵引变压器的二次侧安装并联电抗器来减小容性电流以抑制电容效应,并联电抗器采用自动投切方式。根据电缆牵引网的正常运行要求,设置电压上限阈值 U_U 和电压下限阈值 U_D ,实时采集牵引变压器端口电压 U_x ,通过判断确定并联电抗器是投入还是退出,并联电抗器投切过程如图 11 所示。

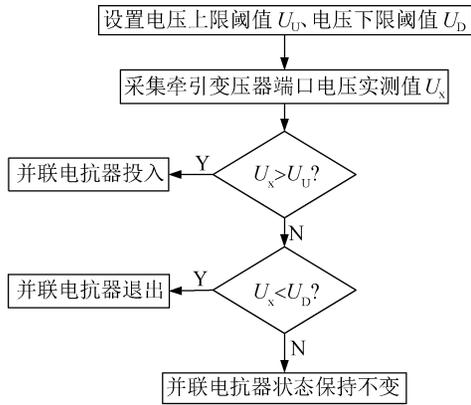


图 11 并联电抗器投切过程

Fig.11 Switching process of shunt reactors

根据式(19)得到补偿系数为 1 时各并联电抗器的容量大小,如表 9 所示。图 12 为补偿后的空载电缆牵引网电压分布情况(图中数字 1—8 为并联电抗器编号),线路电压值均在 110 kV 左右,满足牵引网供电要求。

表 9 并联电抗器容量

Table 9 Capacity of shunt reactors

并联电抗器	容量/(MV·A)	并联电抗器	容量/(MV·A)
1	6	5	21
2	19	6	21
3	24	7	17
4	22	8	7

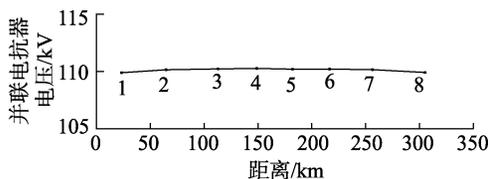


图 12 补偿后的电缆牵引网空载电压

Fig.12 No-load voltage of CTN with compensation

为了分析电缆牵引网的供电能力,仿真紧密运行且无补偿时的电缆牵引网电压,紧密运行条件与 4.1 节相同。图 13 为紧密运行时电缆牵引网的电压分布情况,线路中电压最大值为 108.28 kV,最小值为 104.26 kV。

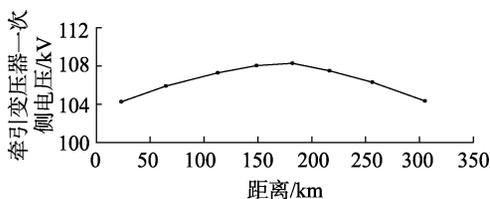


图 13 紧密运行条件下的电缆牵引网电压

Fig.13 Voltage of CTN in close operation condition

图 14 为列车紧密运行时上、下行接触网的电压分布情况。线路上行方向为重车方向,负荷大,而下行方向为轻车方向,负荷较小,故上行接触网电压小于下行接触网电压,但均满足列车正常运行的最低电压要求。

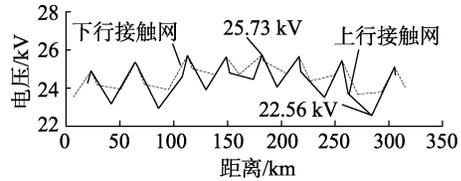


图 14 紧密运行条件下的上、下行接触网电压

Fig.14 Voltage of upstream and downstream contact network in close operation condition

4.5 经济效益分析

新型电缆供电方案需沿线路敷设电缆,随着制造技术发展和城网改造的广泛采用,电缆售价已逐渐降低,630 mm²的 YJLW02-64/110 单芯电缆售价约为 4.54×10⁵元/km。结合文献[13]中的数据,计算得到新型电缆供电方案的电缆回路、外部电源、牵引变压器、主变电所和电缆牵引网的一次性投资情况分别如表 10—14 所示。

通过与既有供电方案进行比较分析,新型电缆供电方案具有以下突出的经济效益。

a. 节省自动过分相装置的投资和维护费用。以地面过分相为例,在充分考虑工作备用的情况下,每

表 10 电缆回路一次性投资

Table 10 One-time investment of cable loop

电缆截面/ mm ²	电缆价格/(万元·km ⁻¹)	安装成本/(万元·km ⁻¹)	回数	长度/km	费用/万元
630	45.4	29.6	2	74.5	22 425
500	37.4	29.6	2	162.6	42 439
400	31.3	29.6	2	164.9	38 009
400	31.3	29.6	1	165.1	22 833
费用总计					125 706

表 11 外部电源一次性投资

Table 11 One-time investment of external power source

电源	数量/距离	单价	费用/万元
上级变电站增容	2 个	10 000 万元/个	20 000
220 kV 间隔	4 个	300 万元/个	1 200
架空输电线	4×30.65 km	80 万元/km	9 808
费用总计			31 008

表 12 牵引变压器的一次性投资

Table 12 One-time investment of traction transformer

牵引变压器容量/(MV·A)	数量/台	单价/(万元·台 ⁻¹)	费用/万元
40	8	432	3 456
50	8	540	4 320
63	16	680	10 880
费用总计			18 656

表 13 主变电所一次性投资

Table 13 One-time investment of main substation

设备	容量/(MV·A)	单价	数量	费用/万元
单相牵引变压器	120	1 296 万元/台	4	5 184
同相补偿装置	455	1.4 元/(V·A)	—	63 700
220 kV 外部电源	—	—	—	31 008
费用总计				99 892

表 14 电缆牵引网一次性投资

Table 14 One-time investment of CNT

设备	费用/万元
牵引变压器	18 656
电缆回路	125 706
可控补偿装置	6 400
费用总计	150 762

处地面自动过分相装置的投资达 600 万元。此外,为了保障运行安全,需要定期更换过分相装置开关及其附属部件,每处装置按照 100 万元/a 考虑。采用新型电缆供电方案后全线的电分相数目将由 31 个减少到 1 个,则由此节省的一次性投资和维护费用分别为 18 000 万元和 3 000 万元/a。

b. 减少与公用电网的接口和外部电源的投资费用。既有供电方案中牵引变压器直接接入 110 kV 公用电网,外部电源投资为 152 128 万元^[13]。相比之下,新型电缆供电方案的主变电所直接接入 220 kV 公用电网,外部电源投资需 31 008 万元,仅为既有供电方案外部电源投资的 20.38%。

c. 提高设备容量利用率,降低牵引变压器的基本费用。既有供电方案中 16 个牵引变电所的总安装容量为 1 135.5 MV·A,而根据 4.1 节的计算,主变电所的总安装容量为 935 MV·A,安装容量减少了 17.66%。按照山西省 25 元/[(kV·A)·月]的基本电价计算,则每年节省基本电费达 6 015 万元。

d. 减少列车牵引力和速度损失,提高线路运量。采用新型电缆供电方案后,电分相数目减少,列车运行时间缩短。在系统供电能力范围内,可适当增加每日列车运行对数,提高线路运量。

5 结论

a. 在考虑各回电缆之间耦合作用的基础上,给出了单相电缆电气参数的计算方法并完成了电缆阻抗和电容等电气参数的计算。

b. 通过建立电缆牵引网的等效模型,给出了单、复线电缆牵引网的电流分配规律和等效阻抗。电缆牵引网的电流分配不仅与电缆阻抗和牵引变压器漏抗有关,同时也与列车取流位置有关。单、复线电缆牵引网等效阻抗均呈马鞍形变化。

c. 以实际线路为例进行了新型电缆供电方案设计,并对新型电缆供电方案的电压水平和经济效益进行了分析。采用新型电缆供电方案,不同运行条件下牵引网电压均满足列车正常运行的要求,并可大幅减少电分相、电源接口数量,提高线路运量,具有比较突出的经济效益。

参考文献:

[1] BATTISTELLI L, PAGANO M, PROTO D. 2×25 kV 50 Hz high-speed traction power system; short-circuit modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1459-1466.

- [2] SHIN H S, CHO S M, KIM J C. Protection scheme using SFCL for electric railways with automatic power changeover switch system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3): 1-4.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘洋. 组合式同相供电设计方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
LIU Yang. The design method of combined co-phase traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [6] 王晓彤, 项祖涛, 班连庚, 等. 500 kV 电缆线路工频参数的计算与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2310-2315.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, BAN Liangeng, et al. Calculation and analysis on power-frequency parameters for 500 kV cable lines [J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2310-2315.
- [7] BRENNA M, FOIADELLI F, ZANINELLI D. Electromagnetic model of high speed railway lines for power quality studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1301-1308.
- [8] HILL R J, CARPENTER D C. Rail track distributed transmission line impedance and admittance; theoretical modeling and experimental results [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1993, 42(2): 225-240.
- [9] CARSON J R. Wave propagation in overhead wires with ground return [J]. Bell System Technology Journal, 1926(5): 539-554.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 铁道部电气化工程局电气化勘测设计院. 电气化铁道设计手册(牵引供电系统)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1988: 94-95.
- [13] 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.
- [14] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 258-260.
- [15] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 72-95.

作者简介:



周婷

周婷(1993—),女,重庆人,硕士研究生,研究方向为牵引供电分析(E-mail: tzhou671@163.com);

解绍锋(1976—),男,河北定州人,教授,博士研究生导师,研究方向为牵引供电系统分析和电能质量。

(下转第 206 页 continued on page 206)

SHI Shengdan, WANG Xiaohong, LU Guangxiang, et al. Analysis of a series resonant Buck-Boost DC-DC converter topology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 86-89.

[16] 王聪, 沙广林, 王俊, 等. 基于双重移相控制的双有源桥 DC-DC 变换器的软开关[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 106-113.

WANG Cong, SHA Guanglin, WANG Jun, et al. The analysis of zero voltage switching dual active bridge DC-DC converters based on dual-phase-shifting control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 106-113.

[17] OGGIERG G, GARC G O, OLIVA A R. Switching control strategy to minimize dual active bridge converter losses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7): 1826-1838.

[18] 赵川红, 徐德鸿, 范海峰, 等. PWM 加移相控制的双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 72-77.

ZHAO Chuanhong, XU Dehong, FAN Haifeng, et al. A PWM plus phase-shift control bidirectional DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 72-77.

作者简介:



罗登

罗登(1989—),男,四川泸州人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子变压器、双向隔离 DC-DC 变化器、动车组辅助变流器、蓄电池充电机(E-mail: lmsgneec105@163.com);

舒泽亮(1979—),男,四川德阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为多电平变换装置、同相供电系统及电力电子应用中的数字信号处理技术等;

林宏健(1987—),男,海南澄迈人,博士研究生,主要研究方向为电力系统;

况祖杭(1992—),男,重庆万州人,硕士,主要研究方向为电力电子与电力传动。

Minimizing leakage inductor current RMS control strategy of bidirectional three-level DC-DC converter

LUO Deng, SHU Zeliang, LIN Hongjian, KUANG Zuhang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the large stress of switching devices and low transmission efficiency of converter when the generalized bidirectional isolated DC-DC converter with two-level H-bridge topology operates under the phase-shift control mode, a scheme with the minimizing inductor current RMS control based on the three-level half-bridge topology is proposed. The proposed scheme replaces the two-level H-bridge topology with three-level half-bridge topology, and adds the corresponding control for the leakage inductor current RMS of transformer to reduce the loss of converter and the stress of switching devices and improve the transmission efficiency of the converter. The control curve is plotted and deduced detailedly based on the expression of inductor current RMS and the condition of ZVS (Zero Voltage Switching), which is used to design the key controller based on FPGA. The experimental platform is established by using SiC MOSFET. The experimental results show that the converter can be improved in aspects of the voltage stress, switching loss and transmission efficiency, verifying the correctness and feasibility of the proposed scheme.

Key words: DC-DC converters; minimizing leakage inductor current RMS control; three-level half-bridge topology; phase-shift control; leakage inductor current of transformer; transmission efficiency

(上接第 195 页 continued from page 195)

New-type cable traction power supply scheme of electric railroad

ZHOU Ting, XIE Shaofeng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Electrical sectioning and power quality are the main technical problems restricting the development of high-speed railway in our country. To meet the development needs of high-speed railway, a new-type cable traction power supply mode is adopted. Considering the coupling effect of cables, the single-phase cable's electrical parameters are calculated. The current distribution rules and equivalent impedance of single and double cable traction network are deduced based on the equivalent circuit of cable traction network. Taking the actual track as an example, the power supply scheme of new-type cable traction is established, the capacity of main substations and traction transformers and the type of each cable section are determined. The feasibility verification and economic analysis of the proposed scheme are carried out. Simulative results show that, the voltage of cable traction network of the proposed new-type cable traction power supply scheme is in the corresponding allowed voltage range in either no-load or load condition, meeting the demands of traction power supply; compared with the existing power supply scheme, the new-type cable traction power supply scheme has obvious economic benefits.

Key words: electric railroads; power supply mode of cable; electrical parameters; current distribution rules; resistance characteristics; scheme design; economic analysis; power quality