

# 树形双边贯通供电方案及其应用研究

晏寒<sup>1</sup>,解绍锋<sup>1</sup>,王辉<sup>1</sup>,刘炜<sup>1</sup>,张继雄<sup>2</sup>,冯文杰<sup>2</sup>

(1.西南交通大学电气工程学院,四川成都611756;2.神华新朔铁路有限责任公司,内蒙古鄂尔多斯010300)

**摘要:**树形双边贯通供电方案能够取消牵引变电所出口和分区所处的电分相,提高系统的供电能力和再生制动能量利用率。介绍了树形双边供电方案的构造;针对树形双边贯通供电方案,以复线直接供电方式为例,推导了牵引网双边供电区间在复线牵引网上下行不并联、末端并联、全并联,以及端头供电臂单边供电等情况下的牵引网阻抗模型;以牵引变电所为单元,构建了树形双边贯通供电系统的全线链式电路模型,给出了潮流迭代方法;将树形双边贯通供电方案应用于某重载铁路贯通供电改造,对既有供电方案和树形双边贯通供电方案的牵引网等值阻抗和方案设计等进行了仿真及对比分析。仿真结果表明,相较于既有方案,树形双边贯通供电方案能够减小牵引网阻抗,提高供电能力,再生制动能量利用率提高至100%,每年通过利用再生制动能量节省的电费约为460.58万元。

**关键词:**电气化铁路;树形双边贯通供电;等值阻抗;链式电路模型;再生制动能量

**中图分类号:**TM 922.3

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202201028

## 0 引言

我国现行电气化铁路为减小三相电压不平衡对电力系统的影响,多采用循环换相的异相供电方式<sup>[1]</sup>,该方式在牵引变电所和分区所处存在电分相。电分相是牵引网上的薄弱环节,会造成列车速度和牵引力的损失<sup>[2-3]</sup>,对于长大坡道,情况尤为严重,若列车无法靠惯性驶出无电区,将造成“坡停”事故。在重载、长大坡道线路或铁路枢纽站所,列车再生制动能量可达牵引能量的10%~30%,然而由于电分相的存在,相邻供电臂无法实现功率交换,导致线路列车的再生制动能量难以被直接利用,造成能量浪费<sup>[4]</sup>。长期以来,为解决电分相问题,多种自动过分相方案被提出<sup>[5]</sup>,这些方案虽然提高了列车通过电分相的自动化程度,但在过分相期间仍然存在断电过程。这一过程往往伴随着过电压、过电流、弓网电弧等暂态过程<sup>[6]</sup>,严重时会导致牵引网或列车故障,影响高速、重载列车的安全可靠运行。

我国电气化铁路正向着高速化、重载化的趋势发展,这对牵引供电系统的供电能力提出了新的挑战。电气化铁路双边供电可作为解决上述挑战的技术手段之一,其不仅可以提高牵引网电压,减小牵引网损耗,提升牵引网供电能力,还能够取消分区所处的电分相,提高系统的供电可靠性和再生制动能量利用率。目前,双边供电在俄罗斯等国家有广泛应

用,其方式视为一种平行双边供电,存在均衡电流问题,会造成额外的电费计量,增加电气化铁路运营成本。随着组合式同相供电技术越来越多地被成功应用,可以在消除一半电分相的同时治理电能质量问题<sup>[7-10]</sup>。为了进一步提高供电能力,解决当前牵引供电系统中存在的不足,将组合式同相供电和双边供电结合的全线无分相贯通供电受到越来越多的关注<sup>[4,11]</sup>。文献[12]提出了一种树形双边供电方案,在满足参与双边供电的两牵引变压器变比相等的情况下,不存在均衡电流。针对树形双边供电,文献[13]介绍了其供电方案,但仅对单线牵引网模型进行了分析。目前国内电气化铁路多为复线牵引网,其等效模型更加复杂,需进一步建立模型分析。

本文对树形双边贯通供电方案进行了研究,以复线直接供电方式为例,建立了复线双边贯通供电的牵引网模型,分析其在不同并联方式下的牵引网等值阻抗;构建了树形双边贯通供电系统的通用链式电路模型,给出了潮流计算方法;将树形双边贯通供电方案应用于某重载铁路贯通供电改造,通过仿真分析对比既有供电方案与贯通供电方案的供电能力和能耗情况。

## 1 树形双边贯通供电方案

树形双边贯通供电方案外部电源如图1所示,牵引供电方案如附录A图A1所示。正常供电时,2个牵引变电所SS<sub>1</sub>和SS<sub>2</sub>的外部电源来自同一电网的220 kV或110 kV电力变电站同一母线的不同分段,由于牵引供电系统为一级负荷,需由2个独立的外部电源S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>供电(图中S<sub>1</sub>投运,S<sub>2</sub>作为备用)。在牵引变电所SS<sub>1</sub>和SS<sub>2</sub>分别设置由单相牵引变压器TT和同相补偿装置CPD组成的单相组合式同相供

收稿日期:2021-02-26;修回日期:2021-11-30

在线出版日期:2022-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877182);四川省科技项目(21YYJC3324)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877182) and Sichuan Science and Technology Program(21YYJC3324)

电装置<sup>[11]</sup>,每个所内设2套装置互为备用,在取消牵引变电所出口处电分相的同时治理了电能质量问题;分区所SP连通,形成树形双边供电,取消分区所处电分相,实现无分相贯通供电。图A1中:牵引网为直接供电方式; $T_1$ 和 $T_2$ 分别为上、下行接触网; $R_1$ 和 $R_2$ 分别为上、下行钢轨。

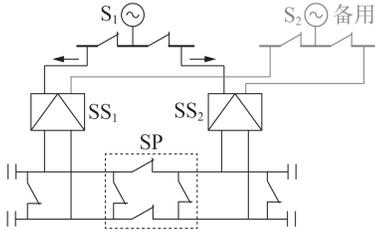


图1 树形双边贯通供电方案的外部电源示意图

Fig.1 Schematic diagram of external power supply source of tree bilateral continuous power supply scheme

## 2 树形双边贯通供电系统牵引网等值阻抗

单线牵引网不存在上下行电磁耦合,其结构和分析方法较为简单。复线牵引网由于上下行的电磁耦合,电气特性更加复杂,分析方法也与单线牵引网有所不同。复线牵引网通常进行上下行末端并联或全并联,为对比分析,下面将以直接供电方式为例,对双边供电区间上下行不并联、末端并联和全并联3种形式的牵引网阻抗进行分析<sup>[14-15]</sup>。另外,考虑当列车驶出双边供电区间后,类似于传统的单边供电,仅从端头牵引变电所的一侧供电臂取电,也对该情形的单边供电模型进行分析。

### 2.1 双边供电区间不并联直供牵引网

双边供电区间不并联直供牵引网归算到牵引网的等值电路如图2所示。图中: $E$ 为电力系统归算到牵引网侧的电动势; $I_1$ 和 $I_2$ 分别为左侧和右侧牵引变电所馈线电流; $U_1$ 和 $U_2$ 分别为左侧和右侧牵引变电所处上行接触网对钢轨的电压; $U'_1$ 和 $U'_2$ 分别为左侧和右侧牵引变电所处下行接触网对钢轨的电压; $A$ 为列车所在位置到其左侧牵引变电所的距离; $L$ 为

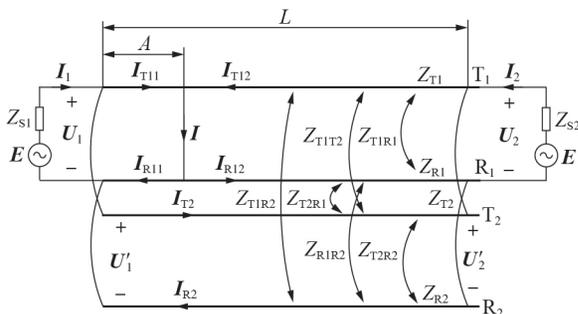


图2 双边供电不并联直供牵引网等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of bilateral no-parallel direct power supply network

构成双边供电的两牵引变电所之间的距离; $I_{T11}$ 和 $I_{T12}$ 分别为列车处左、右两侧接触网电流; $I_{R11}$ 和 $I_{R12}$ 分别为列车处左、右两侧钢轨电流; $I_{T2}$ 为下行接触网电流; $I_{R2}$ 为下行钢轨电流; $I$ 为列车取流; $Z_{T1}$ 和 $Z_{T2}$ 分别为 $T_1$ 和 $T_2$ 的自阻抗; $Z_{R1}$ 和 $Z_{R2}$ 分别为 $R_1$ 和 $R_2$ 的自阻抗; $Z_{T1R1}$ 和 $Z_{T2R2}$ 分别为 $T_1$ 和 $R_1$ 之间、 $T_2$ 和 $R_2$ 之间的互阻抗; $Z_{T1T2}$ 为 $T_1$ 和 $T_2$ 之间的互阻抗; $Z_{R1R2}$ 为 $R_1$ 和 $R_2$ 之间的互阻抗; $Z_{T1R2}$ 和 $Z_{T2R1}$ 分别为 $T_1$ 和 $R_2$ 之间、 $T_2$ 和 $R_1$ 之间的互阻抗; $Z_{S1}$ 和 $Z_{S2}$ 为两牵引变电所折算到牵引网侧的电力系统阻抗,其值见式(1)。

$$\begin{cases} Z_{S1} = Z_{J1} + Z_{TT1} \\ Z_{S2} = Z_{J2} + Z_{TT2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z_{J1}$ 、 $Z_{J2}$ 为两牵引变压器折算到牵引网侧的进线阻抗; $Z_{TT1}$ 、 $Z_{TT2}$ 为两牵引变压器折算到牵引网侧的漏抗。

图2所示电路的上行接触网、钢轨与下行接触网、钢轨存在电磁耦合,即存在互阻抗。为便于后续分析,需对电路进行解耦,推导每根导线的当量自阻抗。

上行接触网-钢轨回路的电压降落 $\Delta U$ 为:

$$\begin{aligned} \Delta U = U_1 - U_2 = & (Z_{T1} - Z_{T1R1}) [AI_{T11} - (L-A)I_{T12}] + \\ & (Z_{R1} - Z_{T1R1}) [AI_{R11} - (L-A)I_{R12}] + \\ & (Z_{T1T2} - Z_{R1T2}) LI_{T2} + (Z_{R1R2} - Z_{T1R2}) LI_{R2} \end{aligned} \quad (2)$$

下行接触网-钢轨回路的电压降落 $\Delta U'$ 为:

$$\begin{aligned} \Delta U' = U'_1 - U'_2 = & (Z_{T1T2} - Z_{T1R2}) [AI_{T11} - (L-A)I_{T12}] + \\ & (Z_{R1R2} - Z_{T2R1}) [AI_{R11} - (L-A)I_{R12}] + \\ & (Z_{T2} - Z_{T2R2}) LI_{T2} + (Z_{R2} - Z_{T2R2}) LI_{R2} \end{aligned} \quad (3)$$

由于两侧牵引变电所处上下行并联,上、下行回路电压损失相等,即:

$$\Delta U = \Delta U' \quad (4)$$

根据式(4)所述等式关系,合并式(2)和式(3),并整理得:

$$\begin{aligned} Z_1 [AI_{T11} - (L-A)I_{T12}] + \\ Z_2 [AI_{R11} - (L-A)I_{R12}] = Z_3 LI_{T2} + Z_4 LI_{R2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $Z_1 - Z_4$ 为4根导线的当量自阻抗,且 $Z_1 = Z_{T1} - Z_{T1R1} - Z_{T1T2} + Z_{T1R2}$ ,  $Z_2 = Z_{R1} - Z_{T1R1} - Z_{R1R2} + Z_{T2R1}$ ,  $Z_3 = Z_{T2} - Z_{T2R2} - Z_{T1T2} + Z_{T2R1}$ ,  $Z_4 = Z_{R2} - Z_{T2R2} - Z_{R1R2} + Z_{T1R2}$ 。

若上下对称布置,可将其行视为完全对偶,则有:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_3 = Z_T - Z_{TR1} - Z_{TT} + Z_{TR2} \\ Z_2 = Z_4 = Z_R - Z_{TR1} - Z_{RR} + Z_{TR2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $Z_T = Z_{T1} = Z_{T2}$ ;  $Z_R = Z_{R1} = Z_{R2}$ ;  $Z_{TT} = Z_{T1T2}$ ;  $Z_{RR} = Z_{R1R2}$ ;  $Z_{TR1} = Z_{T1R1} = Z_{T2R2}$ ;  $Z_{TR2} = Z_{T1R2} = Z_{T2R1}$ 。

对图2所示的等值电路进一步简化,并且进行

Y / Δ变换,可得到图3所示的简化电路。从图3中电流  $I$  处看进去的不并联牵引网等值阻抗  $Z_{P1}$  为:

$$Z_{P1} = Z_{A1} + Z_{A2} + \frac{\bar{Z}_A(L-A)A}{L} \quad (7)$$

式中: $Z_{A1} = [Z_{S1}Z_{S2} + Z_{S1}\bar{Z}_A(L-A)] / Z_{A0}$ ,  $\bar{Z}_A = (Z_1 + Z_2) / 2$ ,  $Z_{A0} = Z_{S1} + Z_{S2} + \bar{Z}_A L$ ;  $Z_{A2} = [Z_{S2}\bar{Z}_A A + \bar{Z}_A^2(L-A)A] / Z_{A0}$ 。

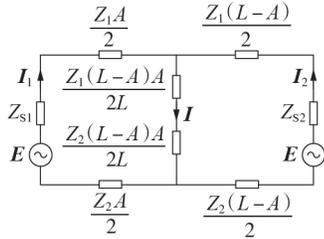


图3 双边供电不并联直供牵引网简化电路  
Fig.3 Simplified circuit of bilateral no-parallel direct power supply network

### 2.2 双边供电区间末端并联直供牵引网

双边供电区间末端并联直供牵引网归算到牵引侧的等值电路如附录 A 图 A2(a)所示,在分区所处设置并联线。将图 A2(a)进一步简化并经 Y / Δ变换可得如图 A2(b)所示的简化电路。从图 A2(b)中电流  $I$  处看进去的末端并联牵引网等值阻抗  $Z_{P2}$  为:

$$Z_{P2} = Z_{A1} + Z_{A2} + \frac{\bar{Z}_A(D_1-A)A}{D_1} \quad (8)$$

式中: $D_1$ 为左侧牵引变电所到分区所的距离。

### 2.3 双边供电区间全并联直供牵引网

双边供电区间全并联直供牵引网归算到牵引侧的等值电路如附录 A 图 A3(a)所示,在区间内每隔一定距离设置一次并联线。将图 A3(a)进一步简化并经 Y / Δ变换可以得到如图 A3(b)所示的简化电路。从图 A3(b)中电流  $I$  处看进去的全并联牵引网等值阻抗  $Z_{P3}$  为:

$$Z_{P3} = Z_{A1} + Z_{A2} + \frac{\bar{Z}_A(D_2-x)x}{D_2} \quad (9)$$

式中: $D_2$ 为列车所在并联区段的长度; $x$ 为列车到其左侧并联线的距离。

### 2.4 单边供电直供牵引网

列车驶出两牵引变电所之间的双边供电区间后,仅从一侧供电臂取电,即单边供电。该情形的模型与双边供电模型类似,但 2 个电源都在列车的同一侧,可沿用前述戴维南等效电路的方法分别对端头供电臂末端并联及全并联方式进行分析。

#### 2.4.1 末端并联

端头供电臂末端并联,其归算到牵引侧的等值电路如附录 A 图 A4(a)所示。将图 A4(a)进一步简化,得到的简化电路如图 A4(b)所示。从图 A4(b)

中电流  $I$  处看进去的单边供电末端并联牵引网等值阻抗  $Z_{P4}$  为:

$$Z_{P4} = Z_{A3} + \bar{Z}_A \frac{(2N-A)A}{N} \quad (10)$$

式中: $Z_{A3} = (Z_{S1}Z_{S2} + Z_{S2}\bar{Z}_A L) / Z_{A0}$ ;  $N$ 为端头供电臂的长度。

#### 2.4.2 全并联

端头供电臂全并联,其归算到牵引侧的等值电路如附录 A 图 A5(a)所示。供电臂上每隔一段距离设置一次并联线。将图 A5(a)进一步简化,得到的简化电路如图 A5(b)所示。从图 A5(b)中电流  $I$  处看进去的单边供电末端并联牵引网等值阻抗  $Z_{P5}$  为:

$$Z_{P5} = Z_{A3} + \bar{Z}_A(A-x) + \bar{Z}_A \frac{(2D_2-x)x}{D_2} \quad (11)$$

## 3 树形双边贯通供电系统链式电路建模及潮流计算

为使模型能够在双边供电与单边供电之间、末端并联与不并联之间灵活可调,将以牵引变电所为单元构建全线的链式电路模型<sup>[16]</sup>,相邻牵引变电所之间以分区所  $\pi$ 型等值电路连接,进而将整条线路描述在一个矩阵中,形成全线的节点导纳矩阵和电流矩阵<sup>[17]</sup>。

全线链式电路模型如图4所示。图中: $Z_{sp}$ 为纵向连接阻抗矩阵; $Y_{sp}$ 为横向连接导纳矩阵;设牵引变电所左、右供电臂切面数量分别为  $h_k$  和  $w_k$  ( $k=1, 2$ ),  $I_{L1(i)}$  ( $i=1, 2, \dots, h_k$ ) 和  $I_{R1(j)}$  ( $j=1, 2, \dots, w_k$ ) 分别为  $SS_1$  左、右供电臂切面处的电流矩阵; $Z_{L1(i)}$  和  $Z_{R1(j)}$  分别为  $SS_1$  左、右供电臂相邻切面之间的阻抗矩阵; $Y_{L1(i)}$  和  $Y_{R1(j)}$  分别为  $SS_1$  左、右供电臂切面的对地导纳矩阵; $I_{ss1}$  为  $SS_1$  牵引变压器电流矩阵,其所在切面为牵引变压器切面; $Z_{ss1}$  为牵引变压器切面到右侧供电臂第一个切面之间的阻抗矩阵; $Y_{ss1}$  为牵引变压器切面对地导纳矩阵,  $Y_{ss1}$  除含有原对地导纳矩阵外,还有一附加矩阵  $Y_{s1}$ ,用于反映系统阻抗对牵引网模型的影响。

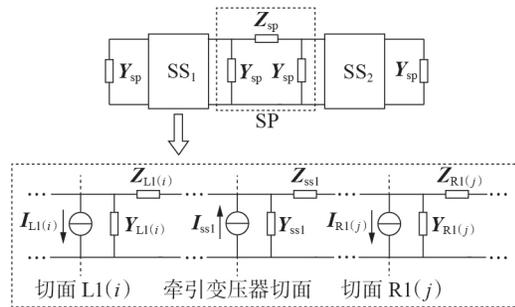


图4 全线链式电路模型

Fig.4 Chain circuit model of all line

以复线直供牵引网为例,导线排列顺序为上行

接触网、上行钢轨、下行接触网和下行钢轨,则  $Y_{S1}$  为:

$$Y_{S1} = \begin{bmatrix} Z_{S1}^{-1} & & -Z_{S1}^{-1} \\ & Z_{S1}^{-1} & -Z_{S1}^{-1} \\ -Z_{S1}^{-1} & & Z_{S1}^{-1} \\ & -Z_{S1}^{-1} & -Z_{S1}^{-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

以复线直供牵引网为例,  $Y_{sp}$  和  $Z_{sp}$  可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{sp} = \begin{bmatrix} \delta & & & \\ & \delta & & \\ & & \delta & \\ & & & \delta \end{bmatrix} \\ Y_{sp} = \begin{bmatrix} \Delta & & -\Delta & \\ & \Delta & & -\Delta \\ -\Delta & & \Delta & \\ & -\Delta & & \Delta \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (13)$$

式中:  $\delta$  为很小的实数(如  $10^{-6}$ ),表示牵引网导线之间存在纵向连接;  $\Delta$  为很大的实数(如  $10^6$ ),表示导线之间存在横向连接。

将  $Z_{sp}$  中上下行接触网对应的自阻抗设置为  $\Delta$ ,即可将双边供电模型转换为单边供电模型。将  $Y_{sp}$  中接触网和钢轨之间的自导纳和互导纳分别设置为  $\delta$  和  $-\delta$ ,即可将末端并联模型转换为不并联模型。对于 2.3 节及 2.4.2 节所述的复线牵引网全并联模型,在图 4 对应的存在横向并联线的切面中附加导纳矩阵  $Y_{sp}$  即可。

第  $k(k=1, 2)$  个牵引变电所单元的节点导纳矩阵  $Y_k$  和电流矩阵  $I_k$  可分别表示为式(14)和式(15),进而,全线的节点导纳矩阵  $Y_{all}$  和电流矩阵  $I_{all}$  可分别表示为式(16)和式(17)。

$$Y_k = \begin{bmatrix} Y_{kL1} & \cdots & & & & \\ \vdots & \ddots & & & & \\ & & Y_{kLk} & -Z_{ssk}^{-1} & & \\ & & -Z_{ssk}^{-1} & Y_{kR1} & & \\ & & & & \ddots & \vdots \\ & & & & \cdots & Y_{kRw_k} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $Y_{kL1} = Y_{Lk(1)} + Z_{Lk(1)}^{-1} + Y_{sp}$ ;  $Y_{kLk} = Z_{Lk(h_k)}^{-1} + Y_{ssk} + Z_{ssk}^{-1}$ ;  $Y_{kR1} = Z_{ssk}^{-1} + Y_{Rk(1)} + Z_{Rk(1)}^{-1}$ ;  $Y_{kRw_k} = Z_{Rk(w_k-1)}^{-1} + Y_{Rk(w_k)} + Y_{sp}$ 。

$$I_k = \begin{bmatrix} I_{Lk(1)} & \cdots & I_{Lk(h_k)} & I_{ssk} & \cdots & I_{Rk(w_k)} \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

$$Y_{all} = \begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & Y_{1Rw_1} + Z_{sp}^{-1} & -Z_{sp}^{-1} & & \\ & & -Z_{sp}^{-1} & Y_{2L1} + Z_{sp}^{-1} & & \\ & & & & \ddots & \\ & & & & & \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$I_{all} = \begin{bmatrix} I_{L1(1)} & \cdots & I_{R1(w_1)} & I_{L2(1)} & \cdots & I_{R1(w_2)} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

设  $U_{all}$  为全线的节点电压矩阵,则基于全线的节

点电压方程为:

$$Y_{all} U_{all} = I_{all} \quad (18)$$

根据链式电路模型的特点,在负荷过程仿真中,每个时刻的牵引网潮流计算只需要形成 1 次牵引供电系统节点导纳矩阵,然后根据设定的初始电压和电流进行迭代。具体迭代步骤如下。

步骤 1: 读取牵引计算数据,生成运行图文件,确定每个时刻  $t$  牵引网上所有列车的位置。

步骤 2: 获取仿真条件和线路参数,包括牵引变电所数量和位置、当前时刻线路列车的数量和位置、牵引网导线线型和数目。

步骤 3: 根据牵引网长度、牵引变电所和牵引负荷分布位置,划分牵引网切面,计算各切面之间的节点导纳矩阵。

步骤 4: 对各切面进行处理,根据式(14)和式(16),形成全线节点导纳矩阵  $Y_{all}$ 。

步骤 5: 根据初始电压计算牵引变电所和列车切面的电流向量,并根据式(15)和式(17)形成全线电流矩阵  $I_{all}$ 。

步骤 6: 根据式(18)求解全线节点电压矩阵  $U_{all}$ , 设各节点电压向量为  $U_i$ 。

步骤 7: 将列车视为功率源,设  $S_{tri}$  为第  $i$  辆列车的功率,  $U_{tri}$  为所在切面的节点电压,则列车的修正电流为  $I_{tri} = (S_{tri}/U_{tri})^*$ 。

步骤 8: 重新形成新的全线电流矩阵  $I'_{all}$ , 根据式(18)求解出新的全线节点电压矩阵  $U'_{all}$ , 从而得到新的各节点电压向量  $U'_i$ 。

步骤 9: 设收敛精度为  $\varepsilon$ , 若满足  $\|U'_i - U_i\| \leq \varepsilon$  则迭代收敛,转入下一步;否则用新的全线节点电压矩阵  $U'_{all}$  代替之前的  $U_{all}$ , 转至步骤 7, 继续迭代,直至收敛。

步骤 10: 保存当前时刻各切面的支路电流和节点电压,仿真进入下一时刻,  $t' = t + \Delta t$ , 其中  $\Delta t$  为仿真时间步长。

步骤 11: 若仿真时刻达到了设定的仿真时长  $T$ , 则保存这一时间段的负荷过程仿真结果,仿真结束;否则,转至步骤 2。

## 4 应用研究

将树形双边贯通供电方案应用于某实际复线重载线路贯通供电改造。该重载线路全长约 130 km, 既有方案供电示意图如附录 B 图 B1(a) 所示, 全线设置 4 个牵引变电所和 3 个分区所, 共 7 处电分相, 各供电臂均设置末端并联。采用树形双边贯通供电方案后, 全线由同一相序供电, 其示意图如附录 B 图 B1(b) 所示, 根据现行负荷情况, 线路上设置两牵引变电所进行无分相贯通供电, 原有  $SS_0$ 、

SS<sub>3</sub>以及SP<sub>1</sub>—SP<sub>3</sub>改为开闭所。电力系统短路容量为1000 MV·A,两牵引变电所均采用单相组合式同相供电方案,牵引变电所的外部电源来自同一个110 kV电力变电站母线的不同分段,满足树形双边供电条件。

仿真参数中,设置接触线型号为CTAH-150,承力索型号为JTM-150,钢轨型号为P60。相关电气参数如附录B表B1所示<sup>[18]</sup>。列车车型为HXD4D,运行速度为80 km/h,功率因数为0.98,载重为10300 t,牵引功率为14.4 MW。按发车时间间隔35 min连续发车,运行图如附录B图B2所示。

#### 4.1 阻抗模值对比分析

根据式(7)—(11),设全并联方式并联区段的长度D<sub>2</sub>分别为10 km和5 km,绘制既有方案和贯通供电方案牵引网阻抗随距离变化的曲线如图5所示。

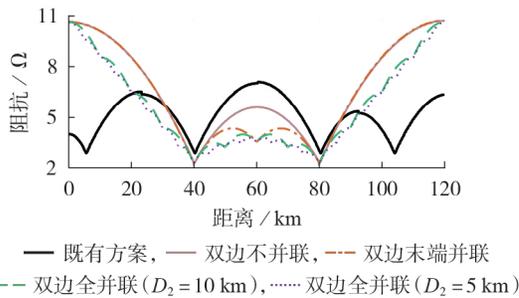
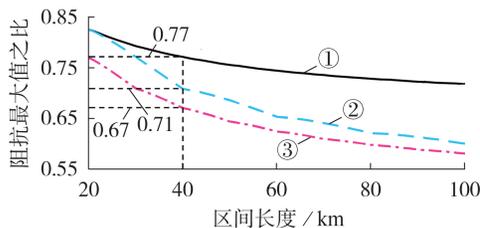


图5 牵引网等值阻抗曲线

Fig.5 Equivalent impedance curves of traction network

由图5可知,SS<sub>1</sub>和SS<sub>2</sub>的双边供电区间内,既有供电方案与双边供电不并联方案的牵引网阻抗最大值分别为7.14 Ω和5.62 Ω,后者约为前者的79%。并且,双边供电牵引网上下行并联后,其阻抗最大值将进一步减小。

双边供电区间不同并联方式牵引网阻抗最大值之比随双边供电区间长度变化的曲线如图6所示。由图可知,双边供电区间长度为40 km时,末端并



- ① 末端并联牵引网阻抗最大值与不并联牵引网阻抗最大值之比
- ② 全并联(D<sub>2</sub>=10 km)牵引网阻抗最大值与不并联牵引网阻抗最大值之比
- ③ 全并联(D<sub>2</sub>=5 km)牵引网阻抗最大值与不并联牵引网阻抗最大值之比

图6 双边供电牵引网阻抗最大值之比曲线

Fig.6 Ratio curves of maximum impedance in bilateral power supply traction network

联、全并联(D<sub>2</sub>=10 km)和全并联(D<sub>2</sub>=5 km)牵引网阻抗最大值分别为不并联牵引网阻抗最大值的77%、71%和67%。并且随着双边供电区间长度的增长,该比例还将进一步减小。

#### 4.2 仿真结果对比分析

通过第3节所述的仿真模型和潮流仿真算法对树形双边贯通供电方案进行仿真。仿真结果如图7和图8所示,统计数据如表1所示。图8中,位置代表供电臂的具体里程。

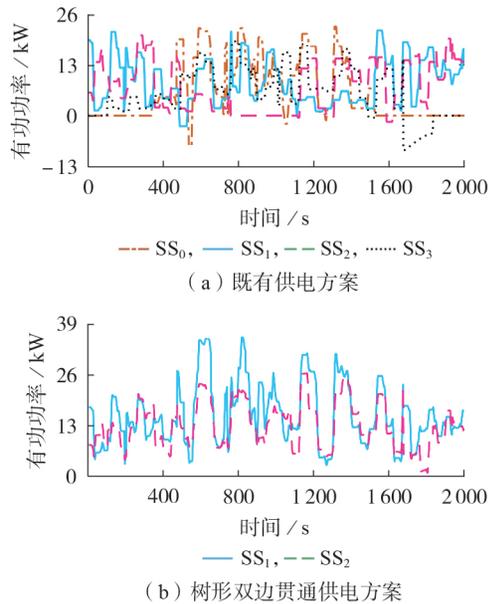


图7 2种供电方案有功功率曲线

Fig.7 Active power curves under two power supply schemes

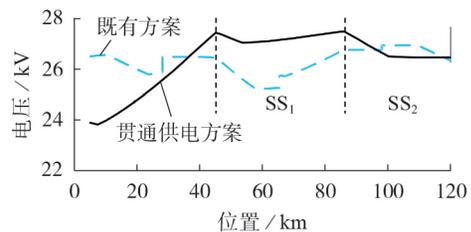


图8 2种供电方式牵引网最低电压曲线

Fig.8 Lowest voltage curves under two power supply schemes

表1 仿真结果统计对比

Table 1 Statistical comparison of simulative results

统计特征值	仿真结果	
	既有供电方案	树形双边贯通供电方案
牵引网最低电压/kV	25.21	23.80
再生制动能量利用率/%	36.17	100.00
再生制动能量利用量/(kW·h)	193.81	1011.69
SS <sub>1</sub> 有功功率最大值/MW	23.98	—
SS <sub>2</sub> 有功功率最大值/MW	23.77	35.61
SS <sub>3</sub> 有功功率最大值/MW	21.47	26.43
SS <sub>4</sub> 有功功率最大值/MW	19.82	—

由图8可知:对于牵引网最低电压曲线,既有供电方案下为每个牵引变电所最低电压时刻该变电所供电范围内的电压曲线;树形双边贯通供电方案下为全线最低电压时刻的全线电压。

设 $S_{re(i)}$ 为第 $i$ 个牵引变电所供电范围内处于再生制动工况的所有列车产生的再生制动能量总量, $S_{ru(i)}$ 为第 $i$ 个牵引变电所供电范围内处于牵引工况的所有列车利用的再生制动能量,则表1中再生制动能量利用率 $S_{\pi}$ 可定义为:

$$S_{\pi} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ru(i)}}{\sum_{i=1}^n S_{re(i)}} \times 100\% \quad (19)$$

式中: $n$ 为牵引变电所数量,既有供电方案下 $n=4$ ;树形双边贯通供电方案下 $n=2$ 。

既有供电方案下,由于牵引供电臂之间存在电分相,列车再生制动产生的能量不能被其他供电臂处于牵引状态的列车利用,导致再生制动能量利用率较低。树形双边贯通供电方案下,全线牵引网无电分相,列车再生制动产生的能量能被牵引网其他供电臂上的列车利用,其再生制动能量利用率高,仿真结果显示,此方案下再生制动能量利用率为100%。

将2种供电方案对比后可知,树形双边贯通供电方案在减少牵引变电所数量的前提下,依然能满足供电能力的要求。设每个发车间隔(35 min)内,既有供电方案的再生制动能量利用量为 $S_{RU1}$ ,树形双边贯通供电方案的再生制动能量利用量为 $S_{RU2}$ ,则每个发车间隔通过再生制动可节省的电量 $\Delta S_{RU}$ 为:

$$\Delta S_{RU} = S_{RU2} - S_{RU1} = 1\,011.69 - 193.81 = 817.88 \text{ (kW}\cdot\text{h)} \quad (20)$$

参考该地区的电费为0.45元/(kW·h),按每天4 h天窗期计算,每年通过利用再生制动能量节省的电费 $Q_s$ 为:

$$Q_s = \Delta S_{RU} \times \frac{60}{35} \times 20 \times 365 \times 0.45 \approx 460.58 \text{ (万元)} \quad (21)$$

## 5 结论

在考虑复线牵引网上下行各导线电磁耦合的基础上,推导树形双边贯通供电牵引网数学模型,得到以下结论。

1)树形双边贯通供电牵引网上下行并联可以减小牵引网单位阻抗。减小并联区间长度可以进一步减小牵引网阻抗,减少电能损耗,延长供电距离。但并联过于密集将导致成本和维护难度增加,牵引网的可靠性也将受影响。因此实际工程应用时,并联间距应视发车间隔、线路条件等实际工况而定。

2)双边供电区间长度越长,并联与不并联牵引网单位阻抗之比越小,设置上下行并联对减小牵引

网单位阻抗的效果越显著。这说明在长距离供电的情况下,适当对牵引网进行并联是有必要的。

3)以某实际重载铁路改造方案为例,对既有供电方案及树形双边贯通供电方案进行了仿真对比。结果显示,相较于既有方案,树形双边贯通供电方案的牵引网阻抗小,供电能力强,再生制动能量利用率达到100%,每年通过利用再生制动能量可节约电能约10.2 GW·h,节省电费约460.58万元,具有良好的经济效益。

由于实例中进行贯通供电改造的重载铁路的牵引网供电方式为复线直接供电,本文主要对复线直接供电的树形双边贯通供电系统进行了研究,没有涉及其他的牵引网供电方案。在高速铁路中,自耦变压器供电方案被广泛应用,因此将树形双边贯通供电方案应用于高速铁路需要在以后的工作中进一步分析。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 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,2012:1-6.
- [2] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报,2010,32(4):119-124.  
LI Qunzhan. On some technical key problems in the development of traction power supply system for high-speed railway in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4):119-124.
- [3] 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.
- [4] 张恒,王辉,李群湛,等. 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[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):204-213.  
ZHANG Heng, WANG Hui, LI Qunzhan, et al. Power supply scheme of traction cable co-phase connected power supply system for heavy-haul railway powered by AT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):204-213.
- [5] 温建民,王帮田,方志国. 高速铁路地面自动过分相系统的研究与运用[J]. 铁道标准设计,2011(4):104-108.  
WEN Jianmin, WANG Bangtian, FANG Zhiguo. Studies and applications of ground auto-passing neutral section separation system for high speed railway[J]. Railway Standard Design, 2011(4):104-108.
- [6] 宋小翠,刘志刚,黄可. 基于状态空间分析法的高铁牵引网弓网燃弧电磁暂态影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(12):184-191.  
SONG Xiaocui, LIU Zhigang, HUANG Ke. Electromagnetic transient influence of pantograph detachment arcing for traction-network in high-speed railway based on state space analysis method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12):184-191.
- [7] 崔贵平,罗隆福,李勇,等. 基于新型YNvd平衡变压器的电气化铁道同相供电系统[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):158-

- 163,180.  
CUI Guiping,LUO Longfu,LI Yong,et al. Co-phase power supply system based on novel YNvd balanced transformer for electrified railway[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(2):158-163,180.
- [8] 张刚毅,李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转换[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):142-145.  
ZHANG Gangyi,LI Qunzhan. Transfer from out-phase power supply to in-phase power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):142-145.
- [9] CHEN M W,LI Q Z,ROBERT S C,et al. Modelling and performance analysis of advanced combined co-phase traction power supply system in electrified railway[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2016,10(4):906-916.
- [10] 刘飞,解绍锋,侯东光,等. 基于器件结温的同相补偿变流器可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):149-155.  
LIU Fei,XIE Shaofeng,HOU Dongguang,et al. Reliability evaluation of co-phase compensation converter based on junction temperature of devices[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(1):149-155.
- [11] 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.
- [12] 李群湛,郭锴,解绍锋,等. 一种电气化铁路外部电网供电构造:CN107176063A[P]. 2017-09-19.
- [13] 周志成. 基于树形双边供电的重载铁路贯通同相供电方案[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(3):722-731.  
ZHOU Zhicheng. Cophase connected power supply scheme of heavy haul railway based on tree bilateral power supply[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2020,17(3):722-731.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张俊骥,吴命利. 基于多负荷端口戴维南等效的电气化铁路牵引网潮流算法[J]. 电工技术学报,2018,33(11):2479-2485.  
ZHANG Junqi,WU Mingli. Power flow algorithm for electric railway traction network based on multiple load port Thévenin equivalence[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(11):2479-2485.
- [17] 何俊文,李群湛,刘炜,等. 交流牵引供电系统仿真通用数学模型及其应用[J]. 电网技术,2010,34(7):25-29.  
HE Junwen,LI Qunzhan,LIU Wei,et al. General mathematical mode for simulation of AC traction power supply system and its application[J]. Power System Technology,2010,34(7):25-29.
- [18] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都:西南交通大学出版社,2014:80-84.

#### 作者简介:



晏寒

晏寒(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为牵引供电系统仿真分析(E-mail: yanhan@my.swjtu.edu.cn);

解绍锋(1976—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为牵引供电系统分析、电能质量分析与控制(E-mail: sfxie@home.swjtu.edu.cn);

王辉(1989—),男,博士研究生,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:wanghuiswjtu@163.com)。

(编辑 李莉)

## Research on tree bilateral continuous power supply scheme and its application

YAN Han<sup>1</sup>,XIE Shaofeng<sup>1</sup>,WANG Hui<sup>1</sup>,LIU Wei<sup>1</sup>,ZHANG Jixiong<sup>2</sup>,FENG Wenjie<sup>2</sup>

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

2. Shenghua Xinshuo Railway Company Limited,Erdos 010300,China)

**Abstract:** Tree bilateral continuous power supply scheme can eliminate the electrical phase separation at the exit and section of traction substation, and enhance the power supply capacity and the utilization rate of the regenerative braking energy. The construction of tree bilateral continuous power supply scheme is introduced. For the tree bilateral continuous power supply scheme, the equivalent circuits of double cable direct power supply traction network in the cases of no-parallel, terminal-parallel and all-parallel, and unilateral direct power supply traction network in the case of terminal power supply arm are derived. Taking each traction substation as a unit, the chain circuit model of the tree bilateral continuous power supply system is constructed, and the power flow iteration algorithm is given. The proposed tree bilateral continuous power supply scheme is applied to the transformation design of an actual heavy-haul railway. The traction network equivalent impedance and scheme design of the existing scheme and the proposed scheme are simulated, compared and analyzed. The simulative results show that, compared with the existing power supply scheme, the tree bilateral continuous power supply scheme can reduce the traction network impedance parameters, improve the power supply capacity, increase the utilization rate of regenerative braking energy to 100%, and save annual electricity cost by about 4.6058 million yuan through using the regenerative braking energy.

**Key words:** electrified railway; tree bilateral continuous power supply; equivalent impedance; chain circuit model; regenerative braking energy

### 附录 A

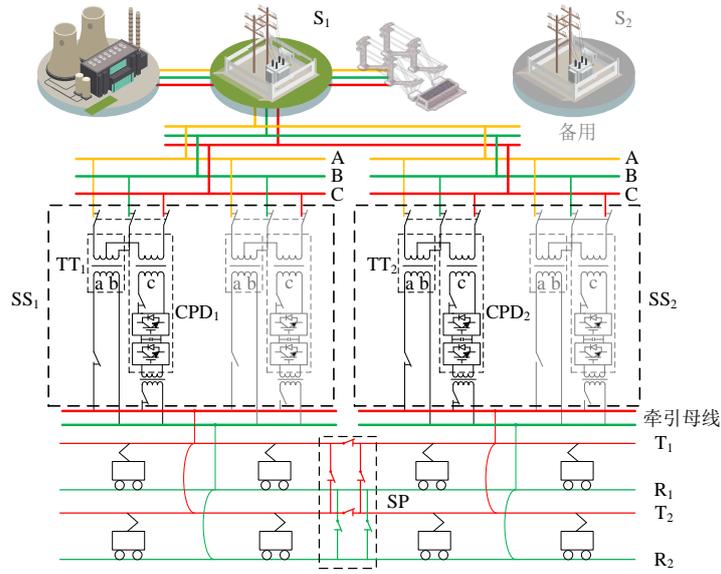
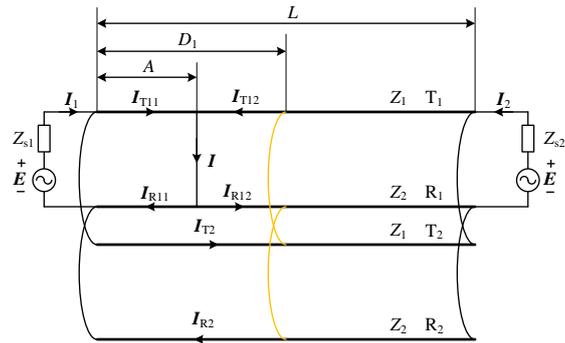
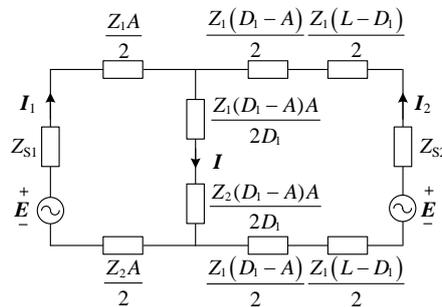


图 A1 树形双边贯通供电方案的牵引供电示意图

Fig.A1 Schematic diagram of external power supply of tree bilateral continuous power supply scheme



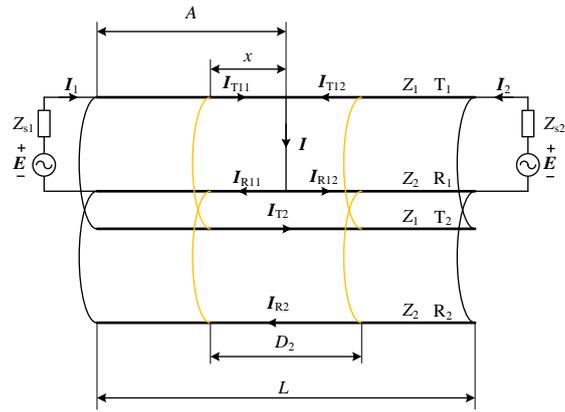
(a) 等值电路



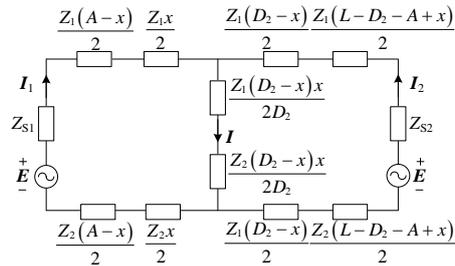
(b) 简化电路

图 A2 双边供电供电末端并联直供牵引网

Fig.A2 Bilateral terminal-parallel direct power supply traction network



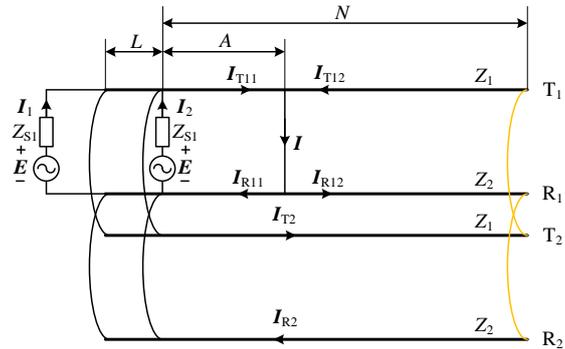
(a) 等值电路



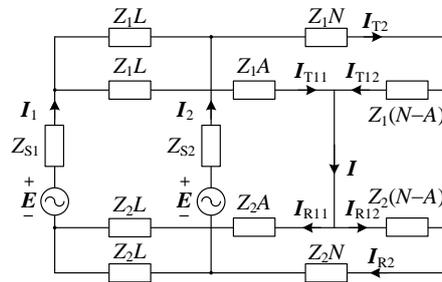
(b) 简化电路

图 A3 双边供电全并联直供牵引网

Fig.A3 Bilateral all-parallel direct power supply traction network



(a) 等值电路



(b) 简化电路

图 A4 单边供电末端并联直供牵引网

Fig.A4 Unilateral terminal-parallel direct power supply traction network

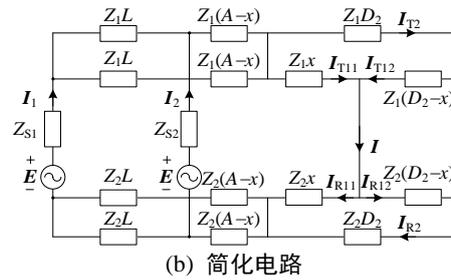
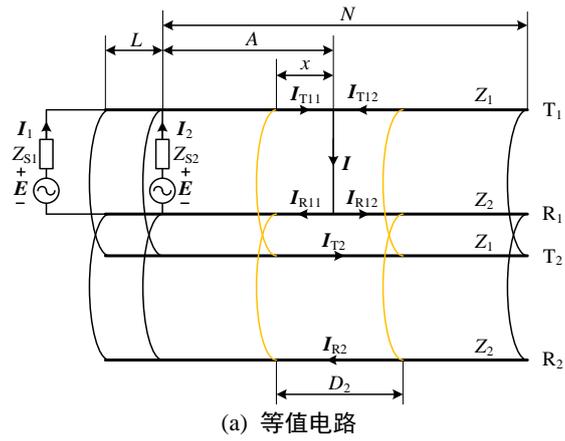


图 A5 单边供电全并联直供牵引网

Fig.A5 Unilateral all-parallel direct power supply traction network

## 附录 B

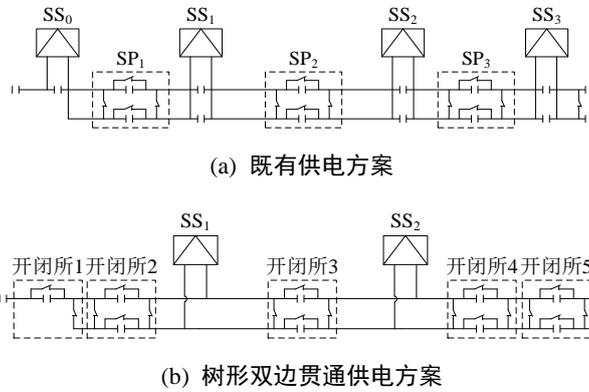


图 B1 供电方案示意图

Fig.B1 Schematic diagram of power supply schemes

表 B1 导体电气参数

Table B1 Electrical parameters of conductors

型号	等效半径/mm	单位电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )
JTM-150	6.16	0.149
CTAH-150	5.56	0.118
P60	12.79	0.135

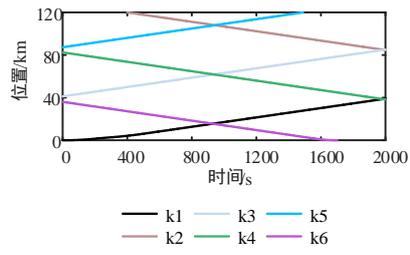


图 B2 35 min 发车间隔运行图

Fig.B2 Operation map in departure interval of 35 minutes