

第一章 牵引供电系统

第一节 牵引供电系统的构成与有关技术问题

一、电流制与额定电压

现代电力牵引普遍从公用电网取电，使用经变换的单相电。目前我国矿山电力牵引、城市电车和地下铁道或轻轨交通都采用直流制，电压从750V~6000V不等；电气化铁路都采用工频(50Hz)，额定电压为27.5kV或55kV($2 \times 27.5\text{kV}$)的单相交流制。

二、牵引供电系统的组成及各部分的作用

电气化铁路供电系统(Traction Power Supply Systems)主要包括：牵引变电所、牵引网、专用高压供电线路(外部电源)。其中，牵引变电所和牵引网构成牵引供电系统。

1.牵引变电所：把电力系统供应的电能变换成适合电力机车牵引要求的电能。

2.牵引网：通常将接触网、馈电线、钢轨回路(包括大地)和回流线称为牵引网。

3.馈电线：连接牵引变电所和接触网的导线。它将牵引变电所变换后的电能送到接触网。

4.接触网：是一种悬挂在轨道上方，沿轨道铺设的、和铁路轨道保持一定距离的输电网。通过电动车组受电弓和接触网的滑动接触，牵引电能

就由接触网进入电动车组，从而驱动牵引电动机使列车运行。

5.轨道：在非电牵引情形下只作为列车的导轨。在电力牵引时，轨道除仍具有导轨功能外，还需要完成导通回流的任务。因此，电力牵引的轨道，需要具有良好的导电性能。

6.回流线：是连接轨道和牵引变电所的导线。通过回流线把轨道中的回路电流导入牵引变电所的主变压器。

交流牵引供电系统的组成如图 1-1 所示。

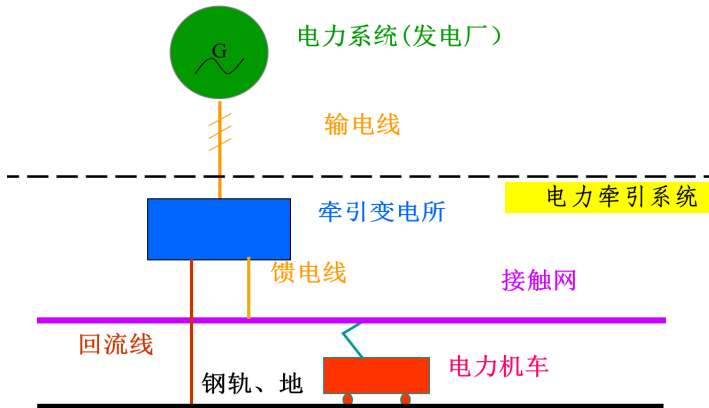


图 1-1 交流牵引供电系统的组成

三、牵引供电系统的取电方式

电气化铁道属一级负荷，根据《TB-10009-2016 铁路电力牵引供电设计规范》规定：“牵引变电所应有两路电源供电，当任一路故障时，另一路仍应正常工作”。其中两路电源可引自不同的地区变电站或同一地区变电站的不同母线。外侧电源给牵引供电系统的供电方式可以分为单侧供电、双侧供电和环形供电三中类型。

1.单侧供电：牵引变电所的电能由电力系统中的一个方向的发电厂送来。

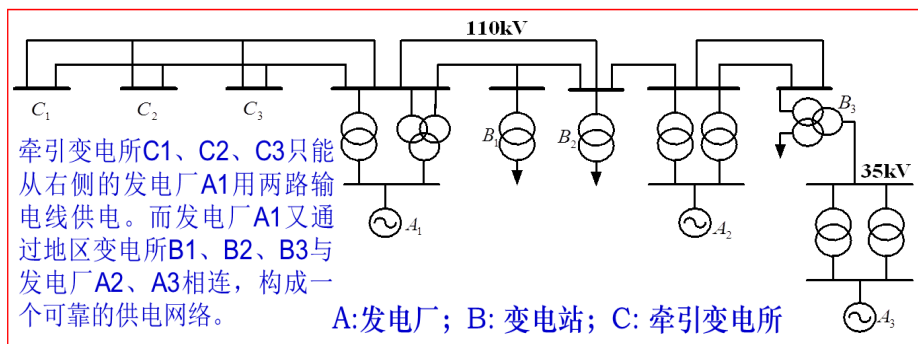


图 1-2 单侧供电示意图

2.两侧供电：牵引变电所的电能由电力系统中两个方向的发电厂送来。

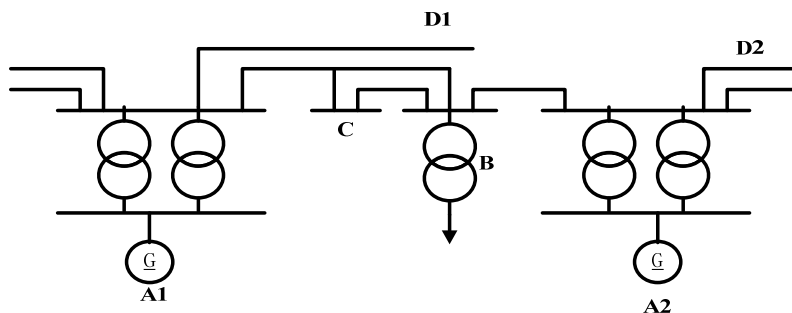


图 1-3 两侧供电示意图

3.环形供电：若干个发电厂、地方变电所通过高压输电线连接成环形的电力系统，牵引变电所处于环形电力系统的一段环路之中。

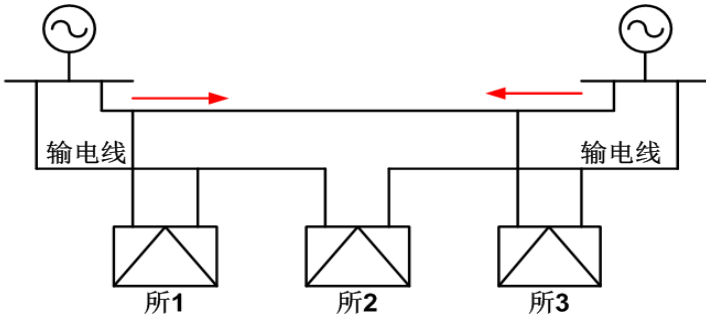


图 1-4 环形供电示意图

电源来自电力系统的两个地区变电所，给铁路供电的输电线是联络这两个地区变电所的通路，采用双路输电线。

第二节 牵引供电系统设施

分区所(Sectioning Post, SP): 设于两变电所之间, 把电气化铁道牵引网分成不同供电区段, 装有开关设备, 根据运行需要可以连接同一供电臂的上、下行接触网, 或连接相邻供电臂以实现越区供电。

分区所的主要作用: 明确各牵引变电所的供电范围, 并在供电分界处接触网上设绝缘分段, 防止电力机车从一个供电分区进入另一供电分区时, 其受电弓短时连通不同供电分区接触网造成相间短路事故。实现牵引网不同运行方式的切换、倒闸。在单线区段, 牵引网可实现单边供电、并联供电或越区供电等方式; 在复线区段则有单边分开供电、单线双边供电、复线纽结供电、复线上、下行在分区所一点并联供电及越区供电等方式。缩小牵引网事故范围。降低牵引网电压损失和电能损失, 提高牵引供电系统效率。

直流牵引网普遍采用的分区所并联供电方式在交流牵引网中却受到限制。其原因在于, 首先, 如果两相邻牵引变电所分别由未联网的两个独立电力系统供电时, 将两牵引变电所二次侧实行并联, 将导致电力系统短路。其次, 即使两牵引变电所由同一电力系统供电, 并联也未必有利。因为将电力系统在牵引侧的单相实行不完全并联, 不仅会打乱电力系统的正常潮流分布, 而且可在并联牵引网内产生可观的“均衡电流”, 给牵引供电系统带来额外电能损失。复线交流牵引网采用较多的分区所运行方式是上、下行接触网一点并联方式。这种方式既避免了电力系统“穿越功率”通过接触网造成的电能损失, 又实现了上、下行接触网的并联供电, 降低了网内

的电压损失和电力损失。

开闭所(Sub-feeder Switching Post, SFSP): 实际上是开关站, 多设于铁路枢纽, 一般两路进线、多路馈线, 用以实现对站场各股道群的分别供电控制。进线和馈线都经过断路器, 可灵活地对各分区接触网停、供电; 在断路器上可实现短路故障保护, 从而缩小事故停电范围; 对 AT 牵引网, 往往同 ATP 合建, 增强对供电臂供电的灵活性。

其特征是电源进线侧和出线侧的电压相同。当然, 区域变电站也具有开闭所的功能。但需明确的是, 开闭所是区别于变电站而言的。

开闭所也指用于接受电力并分配电力的供配电设施, 高压电网中称为开关站。中压电网中的开闭所一般用于 10kV 电力的接受与分配。设有中压配电进出线、对功率进行再分配的配电装置。相当于变电站母线的延伸, 可用于解决变电站进出线间隔有限或进出线走廊受限, 并在区域中起到电源支撑的作用。中压开关站必要时可与配电室合建。

开闭所一般两进多出(常用 4~6 出), 只是根据不同的要求, 进出可以设置断路器、负荷开关。

自耦变压器(AT)所(AT Post, ATP): AT 供电系统, 除变电所、分区所和开闭所外, 在牵引网上放置自耦变压器的场所。自耦变压器(AT)供电方式牵引网以 $2 \times 25\text{kV}$ 电压供电, 并在网内分散设置自耦变压器降压至 25kV 供电力牵引用。与接触网同杆架设一条对地电压为 25kV 但相位与接触网电压反相的“正馈线”, 构成 $2 \times 25\text{kV}$ 馈电系统。自耦变压器变比为 2:1, 其一次绕组接在接触网与正馈线间, 而中点则接至钢轨。在接触网与钢轨和正馈线与钢轨间形成 25kV 电压可供电力牵引用电。这种方式可在不提

高牵引网绝缘水平的条件下将馈电电压提高一倍，可成倍提高牵引网的供电能力，扩展牵引变电所间距，特别适用于高速和重载电气化铁路。

此外，电气化铁路是一种以电能为动力的现代化交通运输工具，其自身不具备电源，往往需要依靠外部能源为其提供电能。随着科技的发展，AT 供电方式在电气化铁路供电系统中得到了广泛的应用，为列车的运行提供了能源依靠。同时，AT 供电方式是一种全新的供电方式，比传统的供电方式相比较而言，有着较高的安全性、防干扰性，因此在我国电气化铁路中得到了广泛的应用。

第三节 牵引变电所一般供电方式

牵引网的供电方式是由牵引网所完成的特殊输电功能的技术要求和经济性能所决定的，基本上可以按分区所运行状态和牵引网设备类型进行分类。按分区所的运行状态，通常分单边供电、双边供电两种方式。按牵引网设备类型可分为 DF (Direct feeding, 直接) 供电方式、BT (Booster-Transformer, 吸流变压器) 供电方式、AT (Auto-Transformer, 自耦变压器) 供电方式和 CC (coaxial cable, 同轴电缆) 供电方式等。

牵引变电所是沿着电气化铁道区段分布的，每一个牵引变电所有一定的供电范围。在相邻两个牵引变电所之间的接触网，为了使其安全、可靠的供电，通常在中央处断开，即分成互相绝缘的两个部分。每一部分称为供电分区，一个供电分区的长度对应于线路的区间数，一般在 1~5 个区间范围内。

一、按分区所运行状态分类

1. 单边供电：接触网供电分区由牵引变电所从一边供应电能，此时的供电分区通常称为供电臂(feeding section)。相邻两牵引变电所之间的供电臂相互绝缘，电力机车只从一个牵引变电所取用 电流。为了在必要时实行越区供电(Over-zone feeding)，在接触网分界点设有隔离开关。

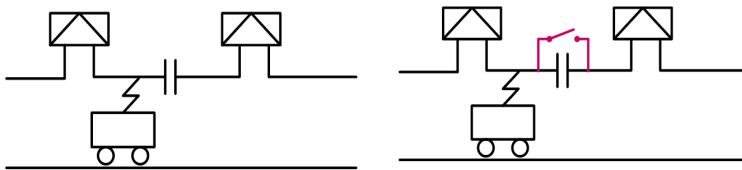


图 1-5 单线区段的单边供电

双线区段的供电方式目前都采用同相的单边供电。分为单边分开供电和单边并联供电。(I)、(II)分别表示为上行接触网和下行接触网。在同一供电分区内，上行和下行的接触网在分区末端联接起来，由同一相供电。

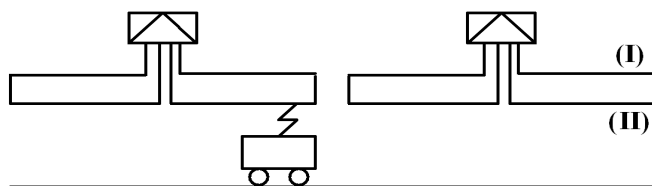


图 1-6 双线区段的单边供电

2.双边供电：在相邻两牵引变电所之间的供电臂分界点，必须设置分区所，实现两边供电。此时电力机车从相邻两牵引变电所取用电流。

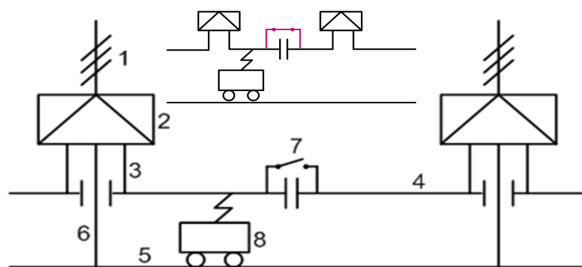


图 1-7 双边供电示意图

二、按牵引网设备类型分类

按牵引网设备类型，牵引供电系统的供电方式可以分为直接供电方式(DF) Direct feeding、吸流变压器供电方式(BT 方式)、带负馈线(回流线)的直接供电方式、自耦变压器供电方式(AT 方式)及同轴电缆供电方式(CC 方式)。

第四节 直接供电方式与带回流线的直接供电方式

1.直接供电方式

直接供电方式(DF)是在牵引网中不增加特殊防护措施的一种供电方式,是结构最简单的一种。直接供电方式示意图如图 1-8 所示。电气化铁路最早大都采用这种供电方式,它的一根馈线接在接触网(T)上,另一根馈线接在钢轨(R)上,这种供电方式结构简单,投资最省,牵引网阻损较小,能耗也较低。供电距离单线一般为 30km 左右,复线一般为 25km 左右。电气化铁路是单相负荷,机车由接触网取得电流经钢轨流回牵引变电所。是在牵引网中不加特殊防护措施的一种供电方式。电气化铁路最早大都采用这种供电方式,它一根馈线接在接触网(Touch)上,另一根馈线接在钢轨(Rail)上。

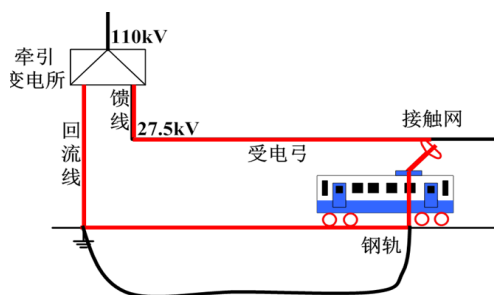


图 1-8 直接供电方式示意图

最早大都采用这种供电方式,对通信干扰不加特殊防护措施,供电方式最简单、投资最省,牵引网阻抗较小,能损也较低。电流经钢轨流回牵引变电所,而钢轨与地并不是完全绝缘的,一部分回流由钢轨流入大地,这部分电流会对通信线路产生感应影响。因此这种供电方式一般用在铁路沿线无架空通信线路或通信线路已改用地下屏蔽电缆的区段。

2. 直接供电方式对通信线路的影响

(1) **静电感应影响。**牵引网是一个单相高压交流电网，接触网带电时，在其周围空间将产生一个工频高压电场，从而使通信线上的各点产生相应的静电感应电压。同接触网电压性质一样，静电感应电压也是一个工频交流电压。

(2) **电磁感应影响。**牵引网由接触网、钢轨网构成，由于钢轨-地之间存在过渡电阻，一部分负荷电流经大地返回变电所，因此，牵引网是一个不平衡的单相回路，接触网和钢轨网电流所产生的感应电势在通信上不能抵消，所以在通信线上将产生电磁感应电势。

(3) **传导电流影响。**由于一部分牵引电流经大地返回牵引变电所，使大地在不同地点出现不同的电位。如果在铁路附近有以地为回路的单导线通信电路，则将由于通信线路两个接地点之间的电位差而出现干扰电流。

3. 带负馈线(回流线)的直接供电方式

在直接供电的基础上增加钢轨的并联导线，便形成了带回流线的直接供电方式。利用接触网与回流线之间的互感作用，使钢轨中的回流尽量由回流线流回牵引变电所，可部分抵消接触网对邻近通信线路的干扰。此种供电方式是高速电气化铁路可选择的供电方式。

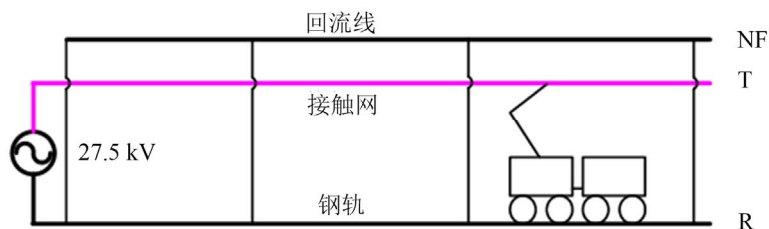


图 1-9 带负馈线(回流线)的直接供电方式

第五节 吸流变压器供电方式

一、吸流变压器供电方式

在牵引供电系统中加装吸流变压器-回流线装置的供电方式，称为吸流变压器供电方式，简称 BT (Booster Transformer)供电方式。在牵引网中，每相距 1.5~4km，设一台变比为 1:1 的吸流变压器，吸流变压器采用变比为 1:1 的特殊变压器，原边串接在接触网上，次边串接在回流线中。间隔约 1.5~4km 设置一台吸流变压器，在两个吸流变压器中间，把轨道和回流线连接起来，这个连接成为吸上线。它是机车电流返回回流线的通路。回流线中流回的电流与接触网内流过的牵引电流大小基本相等，方向相反，它们形成的电磁场相互抵消，这样就显著的消弱了接触网和回流线周围空间的交变磁场，使牵引电流在邻近的通信线路中的电磁感应影响大大的减小。但 BT 方式牵引网结构复杂，造价较高，由于吸流变压器串入接触网，使得牵引网阻抗变大，供电臂长度将减小；因存在 BT 分段(火花间隙)，不利于高速、重载等大电流运行。

二、BT 供电方式特点

牵引网阻抗大，变电所间距小，电分相数量多，不适合高速电力牵引。

(1)使牵引网阻抗显著增大，增加约 50%~60%。接触网-回流线回路比通常牵引网阻抗要高。应用这种装置的牵引网，其阻抗等于接触网-回流线回路阻抗与吸流变压器短路阻抗之和。由于牵引网阻抗增高，使供电臂的电压损失相应增加，在重载和高速运行的情况下尤为严重，有时可能需要缩短牵引变电所间的距离，或增设串联电容补偿，来保证牵引网电压水平。

(2)由于 BT 的串入,使供电臂上每隔一个 BT 间距就出现一个电分段,这些电分段不论在电气上还是在机械上都是薄弱环节。所以 BT 制式不适合和重载和高速铁路。

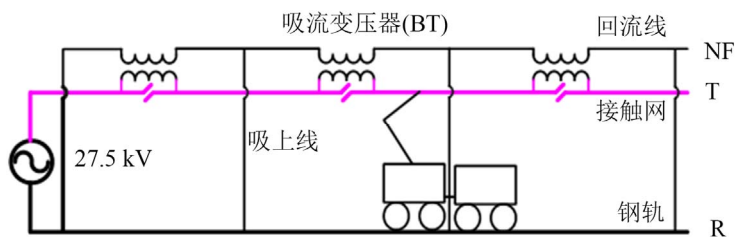


图 1-10 BT 供电方式接线

三、BT 供电方式优缺点

防干扰效果好；牵引网阻抗偏大；电力机车过 BT 时，易产生电弧；由于是串联系统，可靠性较低。

第六节 同轴电力电缆供电方式

一、同轴电缆供电方式

CC (coaxial cable, 同轴电缆)供电方式是一种新型的供电方式。它的同轴电力电缆(CC)沿铁路线路埋设, 内部芯线作为供电线与接触网 1 连接, 外部导体作为回流线与钢轨 2 相接, 每隔 5~10km 做一个分段。

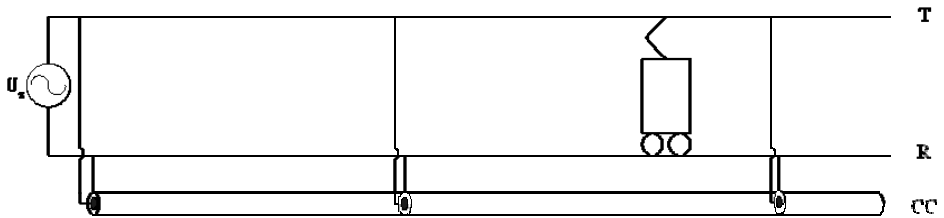


图 1-11 CC 供电方式接线

二、CC 供电方式优缺点

优点：馈电线与回流线在同一电缆中，间隔很小，而且同轴布置，使得互感系统数增大；同轴电缆的阻抗比接触网和钢轨的阻抗小得多，因此牵引电流和回流几乎全部从同轴电缆中流过；电缆芯线与外层导体电流相等，方向相反，二者形成的磁场相互抵消，对邻近的通信线路几乎无干扰；阻抗小，供电距离长。

缺点：投资很大，是几种供电方式中最高的，因此无法在实际系统中大量正式采用，仅在一些特别困难的区段采用。

第七节 AT 供电方式

一、自耦变压器供电方式

自耦变压器供电方式(简称 AT 供电方式), 是每隔 10km 左右在接触网与正馈线之间并联接入一台自耦变压器, 其中性点与钢轨相连。自耦变压器将牵引网的供电电压提高一倍, 而供给电力机车的电压仍为 25 千伏, 如下图所示。

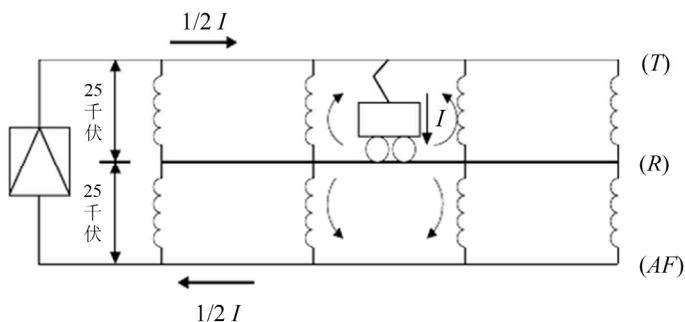


图 1-12 AT 供电方式接线

电力机车由接触网受电后, 牵引电流一般由钢轨流回, 由于自耦变压器的作用, 经钢轨流回的电流, 经自耦变压器绕组和正馈线流回变电所。当自耦变压器的一个绕组流过机车电流时, 其另一个绕组感应出电流供给电力机车, 因此, 当机车负荷电流为 I 时, 由接触网和正馈线供给的电流为 $0.5I$, 另外的负荷电流由自耦变压器感应电流供给。

日本铁路为防止通讯干扰, 在实行交流电气化的前期, 在牵引网中普遍应用了 BT 供电方式。但当高速、大功率机车在这种电路中通过吸流变压器分段时, 在受电弓上会产生强烈电弧, 为了克服此缺点, 后来发展了

一种新的牵引网供电方式——自耦变压器供电方式,AT 间隔为 10km 左右。

这种供电方式的牵引网阻抗很小,电压损失小,电能损耗低,供电能力大,供电距离长,可达 40~50km。由于牵引负荷电流在接触网和正馈线中的方向相反,因而对邻近的通信线路干扰很小。

对供电过程进行分析,自耦变压器容量为:

$$S = U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1-1)$$

串联绕组 Aa 的绕组容量为:

$$\begin{aligned} S_{Aa} &= U_{Aa} I_1 = (U_1 - U_2) I_1 \\ &= U_1 I_1 - \frac{U_1}{k_a} I_1 = S \left(1 - \frac{1}{k_a} \right) \end{aligned} \quad (1-2)$$

公共绕组 ax 的绕组容量为:

$$S_{ax} = U_{ax} I = U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{k_a} \right) = S \left(1 - \frac{1}{k_a} \right) \quad (1-3)$$

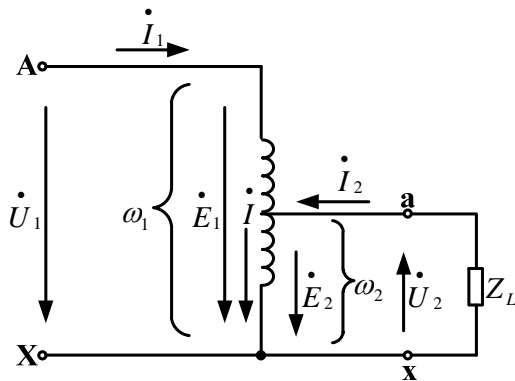


图 1-13 AT 供电方式电路图

取 $ka = 2$ ，则

$$\frac{U_1}{U_2} = 2, \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2} \quad (1-4)$$

对于牵引供电系统，电压为 27.5kV，即：

$$\begin{aligned} U_2 &= 27.5 \text{ kV} \\ \therefore U_1 &= k_a U_2 = 55 \text{ kV} \end{aligned} \quad (1-5)$$

设机车电流为 I ，即：

$$I_2 = I, \therefore I_1 = \frac{1}{k_a} I_2 = \frac{1}{2} I \quad (1-6)$$

输入电压是输出电压的 2 倍，输入电流为输出电流的一半。AT 供电方式无需提高牵引网的绝缘水平即可将牵引回路的供电电压提高一倍。可以大大增加牵引变电所的间距，一般可达 100km 左右，减少牵引变电所的数目。自耦变压器是并联在接触悬挂和正馈线之间的，提高了供电可靠性。

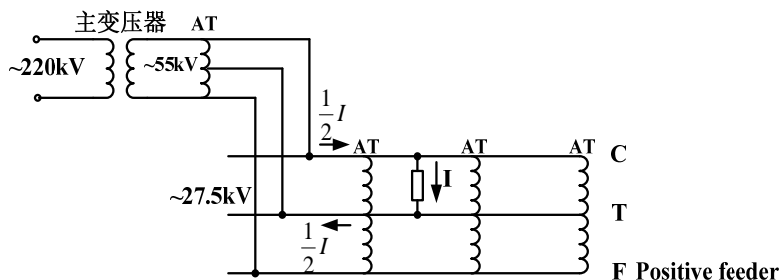


图 1-14 AT 供电方式电流分布

AT 供电方式有效地减弱对通信线的感应影响。大部分回流沿正馈线流回牵引变电所，减小了地中电流。同时，接触网中的电流与正馈线的电流

大小相同，方向相反，两者的交变磁场可以相互抵消。因此，AT 供电的干扰性能十分理想。

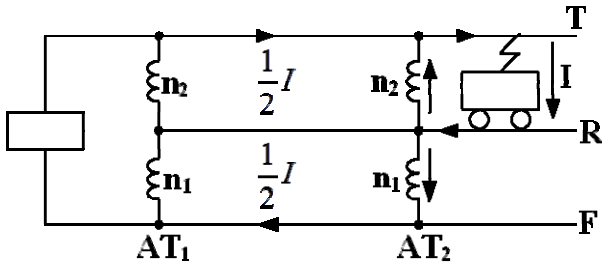


图 1-15 AT 供电方式电流分布

第八节 牵引网供电方式的比较

一、牵引网供电方式

(1)直接供电方式(含带回流线、加强线)

(2)BT 供电方式

(3)AT 供电方式

(4)CC (同轴电力电缆)供电方式

对于高速电气化工程，BT 和 CC 供电方式均存在致命的弱点，是不能予以考虑的供电方式。

二、两种主要的供电方式

(1)AT 供电方式：

300km/h 及以上客运专线：京津城际，京沪，武广，郑西等。

重载铁路：大秦，神朔

供电臂长度约 30km，两个 AT 段

(2)带回流线的直接供电方式：

其它一般铁路，供电臂长度一般 20~25km。

在 BT 供电方式的基础上，取消吸流变压器，但是仍然保留回流线，便形成了带回流线的直接供电方式。利用接触网与回流线之间的互感作用，使钢轨中的回流尽量由回流线流回牵引变电所，可部分抵消接触网对邻近通信线路的干扰。此种供电方式是高速电气化铁路可选择的供电方式。

由于 AT 方式设备复杂，一次投资高、运营费用高、维护困难，特别在多隧道区段应用更为困难。BT 方式由于其半段效应、接触网分段及牵引

网阻抗大等弱点，对高速和重载行车的适应能力差。因此，采用直接供电加回流线(负馈线)。

DN 供电方式：由接触网、钢轨、沿全线架设的负馈线 NF (每隔几公里用 P 金属线和钢轨相连)组成。由于 NF 和钢轨并联连接，使得正常运行时钢轨中负荷电流的一部分分流到 NF 中去，因此，可以减少流入大地的电流，减轻对通讯的干扰危害，降低钢轨电位，减小馈电回路的阻抗。DN 方式与 AT、BT 相比，其馈电回路和设备简单、投资省、运营维护方便。