



论 文

新型轨道交通工频AC 3 kV制式: 列车牵引系统与牵引供电系统

李群湛*

西南交通大学电气工程学院, 成都 610031

* E-mail: lqz3431@263.net

收稿日期: 2022-03-14; 接受日期: 2022-07-29; 网络版发表日期: 2023-04-10

中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(编号: SY2020G001)和四川省科技计划(编号: 21YYJC3324, 2022YFQ0104)资助项目

摘要 伴随着更高速度、更大运量、更加安全可靠和更加绿色节能的新时代城市轨道交通的发展, 包括直流制和工频单相交流制在内的现行牵引供电电流制与列车型号都不能很好地满足其良好发展的需求. 因此, 提出了一种新型轨道交通工频AC 3 kV供电制式, 主要涉及列车牵引系统和牵引供电系统. 重点考虑列车牵引变流器拓扑结构及核心器件IGBT的特点, 确定了新型电流制式电压等级为AC 3 kV; 提出了AC 3 kV列车牵引系统, 分为单相制式、三相制式以及单相/三相兼容制式, 与传统动车组相比, 不再设置车载牵引变压器, 实现列车轻量化; 提出了AC 3 kV单相和三相受电系统, 单相受电系统包含受电弓-接触网方式和受电靴-供电轨(第三轨)等方式, 三相受电系统包含受电靴-第三轨、第四轨方式和受电犁-接触带方式; 提出了新型AC 3 kV牵引供电系统, 分为单相和三相牵引供电两种制式; 对某线路进行工频AC 3 kV和DC 1.5 kV方案研究, 结果表明工频AC 3 kV供电方案在经济性和技术性方面均具有显著优势.

关键词 轨道交通, 列车牵引系统, 牵引供电系统, 受电系统, 工频AC 3 kV

1 引言

目前, 干线铁路和城市轨道牵引供电的电流制式分为直流制和交流制^[1~3]. 城市轨道直流制主要包括DC 750 V和DC 1.5 kV两种^[4]. 交流制有低频单相15 kV(16.7 Hz)和工频单相25 kV两种, 其中15 kV(16.7 Hz)交流制仅在德国及其周边少数国家应用, 而工频单相25 kV交流制则被广泛应用于包括我国在内的世界大多数国家的干线电气化铁路. 近年来, 我

国也开始将其用于城市轨道交通.

直流制有其鲜明的优点: (1) 由于其电压等级远远低于交流制, 土建投资成本更低; (2) 直流牵引供电系统能够构成贯通供电, 无需设置电分相, 没有无电区, 列车运行畅快. 但也存在显著的缺点: 例如, (1) 直流杂散电流对地下金属管道和地基钢结构的长期电化学腐蚀与破坏, 至今无法根治, 对城市地下设施的寿命与安全构成严重威胁, 长远损失无法估量; (2) 约占牵引能量的30%~50%的再生能量^[5]不能直接利用, 为了节能,

引用格式: 李群湛. 新型轨道交通工频AC 3 kV制式: 列车牵引系统与牵引供电系统. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 107~118

Li Q Z. Novel rail transit power frequency AC 3 kV mode: A train traction system and traction power supply system (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 107~118, doi: [10.1360/SST-2022-0096](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0096)

需要增设昂贵的逆变回馈设备或储能设备, 经济性受到影响, 同时, 逆变回馈设备和储能设备存在工作死区, 导致列车再生制动失灵而转向空气制动, 增加高速和长大坡道运行的安全隐患。

近年来, 我国一些特大城市, 例如北京、广州、成都、深圳等, 对城市轨道交通提出了更大运量和更高运行速度的发展需求, 其中运行速度达到160 km/h甚至更高, 在没有合适的直流制国产配套机车车辆和其他更好制式支持的情况下, 开始将干线电气化铁路的工频单相25 kV交流制引入城市轨道交通建设中。

工频单相25 kV交流制确有一些突出优点: 电压等级高、供电能力强、列车运行速度更快、结构简单、维护方便。但是, 由于列车为大功率单相负荷, 为了减少对三相电网的不平衡影响, 通常在牵引变电所出口处以及相邻牵引变电所之间的分区所设置电分相, 这便会形成无电区, 又反过来影响列车安全运行。高速铁路的列车速度高, 利用惯性冲过电分相无电区, 掉速不明显, 但对于城市轨道交通, 由于站间距短、行车速度较低、启停频繁、坡道较大、行车密度大, 列车通过无电区因失电而掉速显著, 不仅制约运力发挥, 加重司机劳动强度, 严重时还会造成停车事故, 即是说, 电分相无电区带来的不良影响将会在城市轨道交通上进一步叠加和放大。虽然, 采用同相供电技术^[6,7]可以消除牵引变电所的电分相, 但消除相邻牵引变电所之间分区所的电分相涉及穿越功率与用户经济运行, 如要获得电网与铁路两全其美的解决方案, 尚需深入的理论研究和试验验证。同时, 与1.5 kV直流制相比, 工频单相25 kV交流制的接触网需要较大的上部净空, 导致隧道断面加大, 从而使城市轨道交通的投资大大增加。

与此同时, 原来1.5 kV直流制的A型车、B型车也不能适于大运量、快速度的城市轨道交通发展的需求, 而高铁的和谐号、复兴号也不能套用于城市轨道交通, 显然, 列车型谱中需要添加新的列车型号才能满足城市轨道交通发展的需求。

可见, 现行牵引供电电流制与列车型号都不能很好地满足新时代城市轨道交通良好发展的需求, 并且随着时间的推移和规模的扩大, 问题将愈发突出和严重。

于是, 我们不得不直面一个严峻的课题: 什么才是城市轨道交通最优的制式? 可以肯定不是直流制, 而

是交流制, 是克服了现有工频单相AC 25 kV交流制缺点的新的工频交流制, 这就需要提出和研究新型轨道交通牵引供电电流制、牵引供电系统^[8]和新型列车牵引系统。

2 新型轨道交通牵引供电的电压等级

列车的良好运行需要合格的牵引供电电压, 在文献^[8]中牵引网电压等级确定时考虑的网压、隧道净空等因素的基础上, 新型轨道交通牵引供电电压等级的确定需满足以下条件。

(1) 供电能力强, 牵引变电所每条馈线的供电容量应大于10 MVA。

(2) 不设电分相, 没有无电区。

(3) 列车轻量化, 省却车载牵引变压器。

(4) 列车牵引系统额定电压尽可能高, 其变流器、牵引电机制造技术成熟、可靠。

(5) 采用国家标准电压等级。

同时, 在满足上述条件情况下选用最高的电压等级, 并保证经济安全、节能环保等。综合可知, 选用更高的电压等级可提高牵引网的供电能力。由条件(3)和(4)可知, 牵引网电压越高, 要求列车牵引系统适应的电压等级就越高。列车牵引系统中最关键的是牵引变流器, 而制约牵引网电压提升的关键因素是牵引变流器功率器件IGBT耐受电压以及牵引变流器主电路拓扑的选型。

按照标称电压对牵引变流器功率器件IGBT进行划分, 当前市场上应用量相对比较广泛的主要有1.7, 3.3, 4.5, 6.5 kV几类, 其中3.3 kV的IGBT在动车组中应用最为广泛, 6.5 kV的IGBT在CRH3和CRH5中应用; 1.7和4.5 kV的IGBT在新能源和工业变频领域有广泛应用。

按照应用拓扑结构对牵引变流器主电路拓扑进行划分, 目前比较成熟的应用拓扑有两电平和三电平两种, 其中三电平拓扑在相同的器件标称电压下能承受更高的工作电压。

统计各类型牵引变流器功率器件IGBT的应用参数, 在两电平和三电平拓扑下能支持的牵引网电压等情况, 如表1所示。

从表1看, 采用6.5 kV标称电压的IGBT构建三电平拓扑, 其牵引变流器可支持的输入电压为5092 V, 接近

表 1 IGBT经验应用参数

Table 1 Experience application parameters of IGBT

标称电压 (kV)	应用开关频率	应用直流电压 (V)	选型最大电流 (A)	变流器输入电压 (两电平拓扑) (V)	变流器输入电压 (三电平拓扑) (V)
1.7	≤3 (kHz)	≤1200	3600	≤848	≤1696
3.3	≤1 (kHz)	≤1800	2000	≤1273	≤2546
4.5	≤600 (Hz)	≤2800	1200	≤1980	≤3960
6.5	≤500 (Hz)	≤3600	1000	≤2546	≤5092

但未达到6 kV国家标准电压等级; 采用4.5 kV标称电压的IGBT构建三电平拓扑, 其牵引变流器可支持的输入电压为3960 V, 达到并高于3 kV国家标准电压等级. 考虑到全部满足上述五项条件下选用最高的电压等级的牵引供电电压只有国家标准电压3 kV这一等级, 并且牵引变流器可支持的输入电压高于3 kV, 于是, 选择牵引供电标称电压3 kV, 列车牵引系统应选择4.5 kV的IGBT构建三电平拓扑牵引变流器与之配套.

3 AC 3 kV列车牵引系统

工频单相25 kV交流制的列车牵引系统^[9]由受电弓、高压电器(断路器、电流互感器、电压互感器)、牵引变压器、牵引变流器(四象限整流器、直流环节、逆变器)、牵引电动机、齿轮箱和牵引控制器等部分构成, 如图1所示.

下一节会看到, 地面牵引供电系统分为单相制式

和三相制式两种, 由此, AC 3 kV列车的牵引系统相应地也分为单相和三相两种制式, 其牵引系统分别如图2(a)和(b)所示, 即单相AC 3 kV列车牵引系统受电于地面单相AC 3 kV牵引供电系统, 三相AC 3 kV列车牵引系统受电于地面三相AC 3 kV牵引供电系统. 比较图1和2可见, AC 3 kV列车牵引系统取消了AC 25 kV列车牵引系统的牵引变压器环节, 取而代之的是体积更小、重量更轻的并网电抗器, 可有效减少列车轴重, 实现列车轻量化, 优化列车空间利用, 提高列车承载效率. 以定员610人的4动4拖标准动车组为例, 其两台牵引变压器总重为13.4 t, 若并网电抗器按照2 t总重计算, 则整车减重为11.4 t, 约合160人的重量, 轻量化效果显著.

AC 3 kV列车牵引系统的核心装置是牵引变流器和牵引电机. 与AC 3 kV列车牵引系统对应, 其牵引变流器也分单相和三相牵引变流器. 单相和三相牵引变流器都包含四象限整流电路、中间直流环节以及牵引

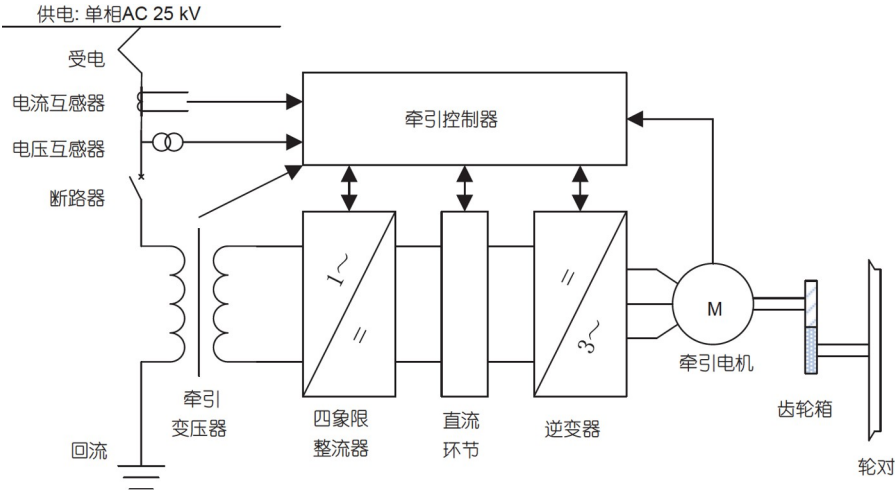


图 1 工频单相AC 25 kV列车牵引系统

Figure 1 Power frequency single-phase AC 25 kV train traction system.

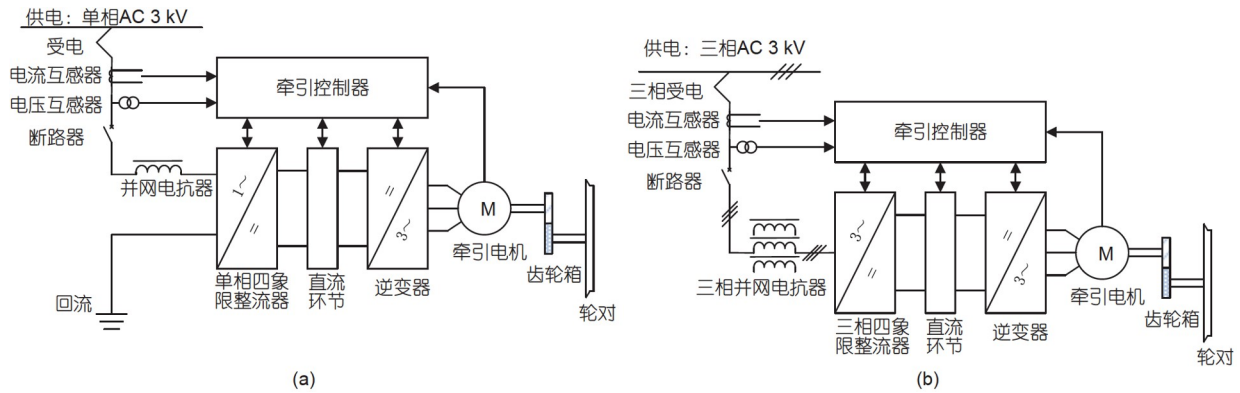


图2 AC 3 kV列车牵引系统. (a) 单相AC 3 kV列车牵引系统; (b) 三相AC 3 kV列车牵引系统
Figure 2 AC 3 kV train traction system. (a) Single-phase AC 3 kV train traction system; (b) three-phase AC 3 kV train traction system.

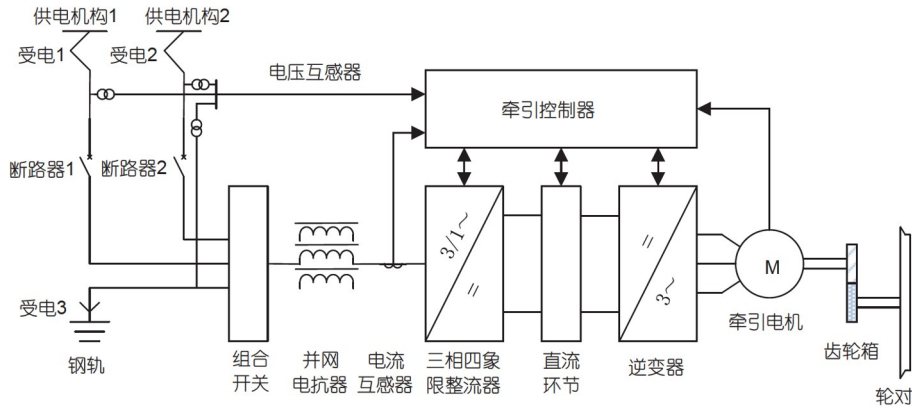


图3 单相/三相兼容的列车牵引系统示意图
Figure 3 Schematic diagram of single-phase/three-phase compatible train traction system.

逆变电路三部分, 其中牵引逆变电路相同, 四象限整流电路有单相和三相之分; 另外, 三相牵引变流器中理论上已经不存在直流二次波动, 因此将其二次滤波电路取消, 其直流支撑电容参数也可以设计得更小。

为增加AC 3 kV列车对地面单相和三相牵引供电制式的适应性, 提升应用的灵活性, 还可将列车牵引系统设计成单相/三相兼容的形式^[10], 如图3所示。三相制式下, 列车牵引系统需要3个受电点, 分别与供电机构1、供电机构2和钢轨接触受电; 单相制式下, 列车牵引系统只需要2个受电点, 分别与供电机构1(或供电机构2)和钢轨接触受电, 或者分别与供电机构1和供电机构2受电, 其中供电机构可以是接触网或供电轨。牵引控制器通过电压互感器可以自动识别地面牵引供电制式, 控制组合开关来实现牵引系统的四象限整流器进行三相和单相整流模式的自动切换。设计上需要保证整流器工作在两种模式下功率器件容量都可以得到充

分利用。

在AC 3 kV制式下, 列车牵引变流器的整流电路除了进行中间直流电压稳压控制外, 还可通过整流电路的无功功率调整来实现系统功率因数和牵引网电压的调整。

为增强AC 3 kV列车工作的稳定性, 同时在保证安全的前提下, 充分发挥牵引系统的最大工作能力, 牵引系统应能适应牵引网电压在一定范围内波动。牵引网电压和对应牵引系统轮周功率的限制关系如图4所示, 其中 Pe^* 为牵引系统轮周功率的标么值, Ue^* 为牵引网电压的标么值。

在牵引工况下:

(1) 当牵引网电压 Ue^* 在0.8~1.1之间, 轮周功率为额定功率;

(2) 当牵引网电压 Ue^* 在0.8~0.7之间, 轮周功率 Pe^* 从1.0直线下降至0.8;

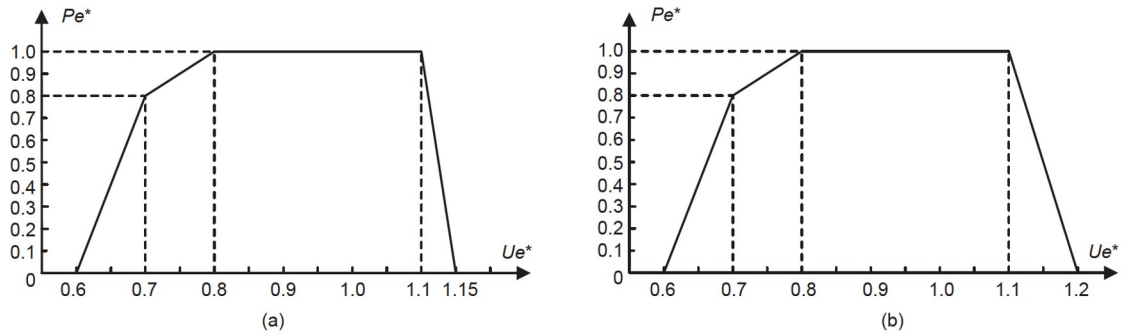


图 4 牵引网电压与轮周功率限制曲线. (a) 牵引工况; (b) 再生工况

Figure 4 Limit curve between traction network voltage and wheel cycle power. (a) Traction condition; (b) regeneration condition.

(3) 当牵引网电压 Ue^* 在 $0.7 \sim 0.6$ 之间, 轮周功率 Pe^* 从 0.8 直线下降至 0 ;

(4) 当牵引网电压 Ue^* 在 $1.1 \sim 1.15$ 之间, 轮周功率 Pe^* 从 1.0 直线下降至 0 .

在再生工况下:

(1) 当牵引网电压 Ue^* 在 $0.8 \sim 1.1$ 之间, 轮周功率为额定功率;

(2) 当牵引网电压 Ue^* 在 $0.8 \sim 0.7$ 之间, 轮周功率 Pe^* 从 1.0 直线下降至 0.8 ;

(3) 当牵引网电压 Ue^* 在 $0.7 \sim 0.6$ 之间, 轮周功率 Pe^* 从 0.8 直线下降至 0 ;

(4) 当牵引网电压 Ue^* 在 $1.1 \sim 1.2$ 之间, 轮周功率 Pe^* 从 1.0 直线下降至 0 .

与传统动车组牵引电机相比, 新型 AC 3 kV 列车牵引电机的最大差异在于绝缘等级的提升. 根据牵引变流器设计参数, 新型牵引电机绝缘应该满足 5000 V 的要求. 目前国内主要的牵引电机生产厂家均具备该电压等级牵引电机的生产能力.

4 AC 3 kV 受电系统

列车牵引系统通过受电系统从地面牵引供电系统获取电能. 对应牵引供电系统和列车牵引系统, AC 3 kV 受电系统也有单相与三相之分. 单相制式下, 可以使用现行的受电弓-接触网方式^[11]或者受电靴-供电轨(第三轨)方式, 亦可使用第三轨和第四轨方式. 三相制式下, 现行的受电弓-接触网方式、受电靴-供电轨方式都不能单独使用, 但可以结合起来与钢轨一起使用, 即受电靴-第三轨、第四轨和钢轨方式, 或者建造新型接触式受电系统.

现行的受电靴-供电轨(第三轨)方式存在严重缺陷, 即列车在运行中产生的横向震动和垂向震动对受电靴与供电轨的接触性能和受电性能产生不良影响, 难以胜任高速运行. 为了消除震动影响, 有效提高接触性能和受电性能, 提出并研究了一种新型接触式受电装置^[12], 分为上接触式和下接触式. 上接触式受电装置如图 5(a)所示, 下接触式受电装置如图 5(b)所示. 图 5(a)中 1 为固定架, 2 为上接触受电臂, 2a 和 2b 分别为 2 的连接端和接触端, 3 为列车转向架, 4 为第三轨, 5 为转轴, 6 为限位片, 7 为 2b 的接触部; 图 5(b)中 8 为固定架, 9 为下接触受电臂, 9a 和 9b 分别为 9 的接触端和配重端, 10 为列车转向架, 11 为转轴, 12 为第三轨, 13 为限位片, 14 为 9a 的接触部.

新型接触式受电装置的受电臂通过固定架的杠杆作用形成力矩, 在受电臂的接触部与供电轨踏面之间产生接触力, 该接触力和接触面积不受列车在运行中产生的横向震动和垂向震动的影响, 因此受电性能和工况更

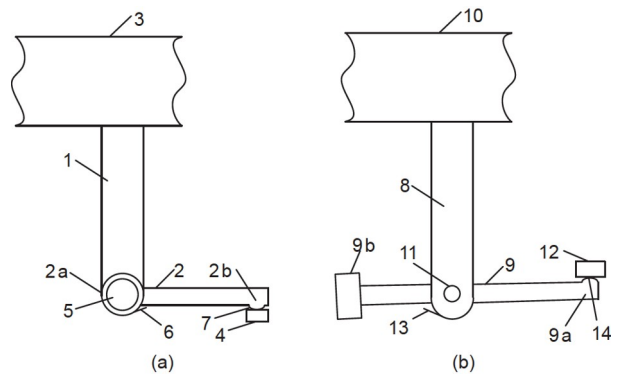


图 5 AC 3 kV 供电系统新型接触式受电装置. (a) 上接触式; (b) 下接触式

Figure 5 Novel contact power receiving device for AC 3 kV power supply system. (a) Up contact; (b) down contact.

加稳定; 固定架与列车转向架固定连接, 采用固定架与受电臂铰链连接的方式化解列车在运行中产生的垂向震动对受电臂与供电轨的接触受电性能的不良影响, 采用受电臂的接触部与供电轨上、下表面之间的滑动方式, 可以化解列车在运行中产生的横向震动对受电臂与供电轨的接触受电性能的不良影响, 使受电臂与供电轨的接触面积保持不变, 进而大大提高受电性能。

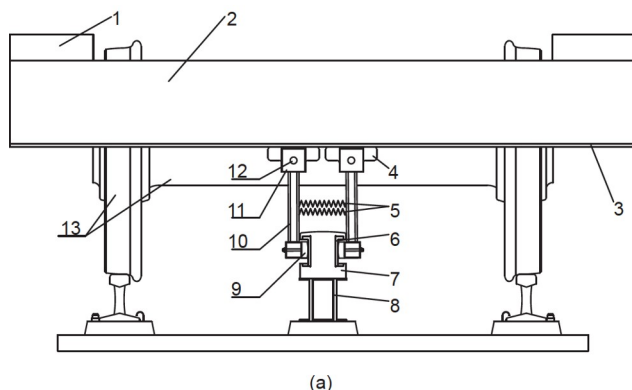
在此基础上, 提出专门用于三相制式的新型受电系统, 即为受电犁-接触带系统^[13], 其结构和安装位置分别如图6(a)和(b)所示。图6(a)中1为转向架, 2为支架, 3为横梁, 4为轴承座, 5为弹簧, 6为左、右供电轨, 7为绝缘底座与护盖, 8为支撑梁, 9为受电靴, 10为绝缘支臂, 11为限位块, 12为转轴, 13为轮对。接触带由两个供电轨和绝缘底座组成, 两个供电轨a和b分别安装在绝缘底座左上方和右上方。通过转轴与轴承座铰接来化解列车横向震动对受电靴与供电轨之间接触力的影响, 通过受电靴在供电轨踏面的垂向滑动来化解列车垂向震动对接触面积的影响, 从而在列车运行中保持优良的受电性能, 更好地适应高速运行需求。

与早期的受电弓-接触网三相制式不同, 通过受电犁-接触带系统技术设置可以实现列车不断电过道岔^[14], 满足实用要求。

新型受电装置对人身安全的要求与现行受电靴一样, 可循有关标准和规范。

5 新型AC 3 kV牵引供电系统

新型AC 3 kV牵引供电系统分为单相和三相牵引供电两种制式。



5.1 单相AC 3 kV牵引供电系统

单相AC 3 kV牵引供电系统由外部电源、主变电所、中压电缆、牵引变电所、牵引网等构成中压电缆+牵引网两级供电方式, 如图7所示。外部电源通过三相输电线将110或220 kV电能输送至主变电所, 其中主变压器再将电能变换至35或66 kV并将变换后的电能输送至35或66 kV中压电缆。中压电缆与线路平行, 将电能输送至各个牵引变电所。牵引变电所中设置电力配电变压器、牵引变压器和同相供电装置, 将高电压等级电能转化至低电压等级电能。配电变压器供给动力照明供电系统, 牵引变压器和同相供电装置供给牵引供电系统, 分别向动力照明负荷和牵引负荷供电。采用同相供电技术取消变电所出口处的电分相和无电区, 同时治理牵引负荷造成的三相电压不平衡等电能质量问题, 确保向动力照明负荷提供合格的电能。

设牵引负荷功率为 S_L (MVA), 功率因数为1, 负序功率允许值为 S_e (MVA), 可推导出通过牵引变压器的功率 S_T (MVA)和通过同相供电装置的最小功率 S_C (MVA)分别为^[7]

$$\begin{bmatrix} S_T \\ S_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_e \\ S_L \end{bmatrix}$$

其中, $S_e = u_e \times S_d / 100$, u_e (%)为三相电压不平衡度限值, S_d (MVA)为系统短路容量, 注意由于牵引变电所中动力照明负荷临近牵引负荷, 三相电压不平衡造成的影响会更加明显, 因此, u_e 应当比国标更为严格, 一般应控制在1%及以下。

牵引网采用柔性(或刚性)接触网的单相AC 3 kV供电系统结构如图7(a)所示; 牵引网采用第三轨形式

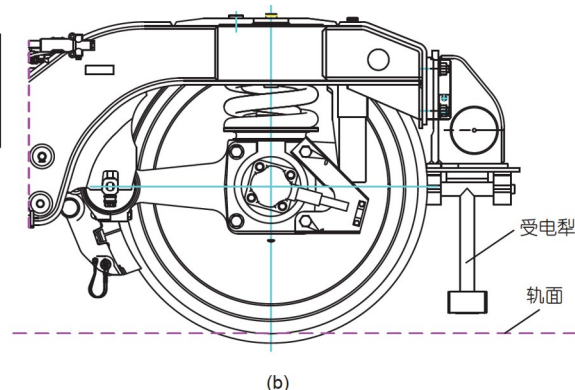


图6 (网络版彩图)受电犁-接触带系统示意图。(a) 结构示意图; (b) 安装位置示意图

Figure 6 (Color online) Schematic diagram of electric plow with contact band. (a) System structure; (b) installation position.

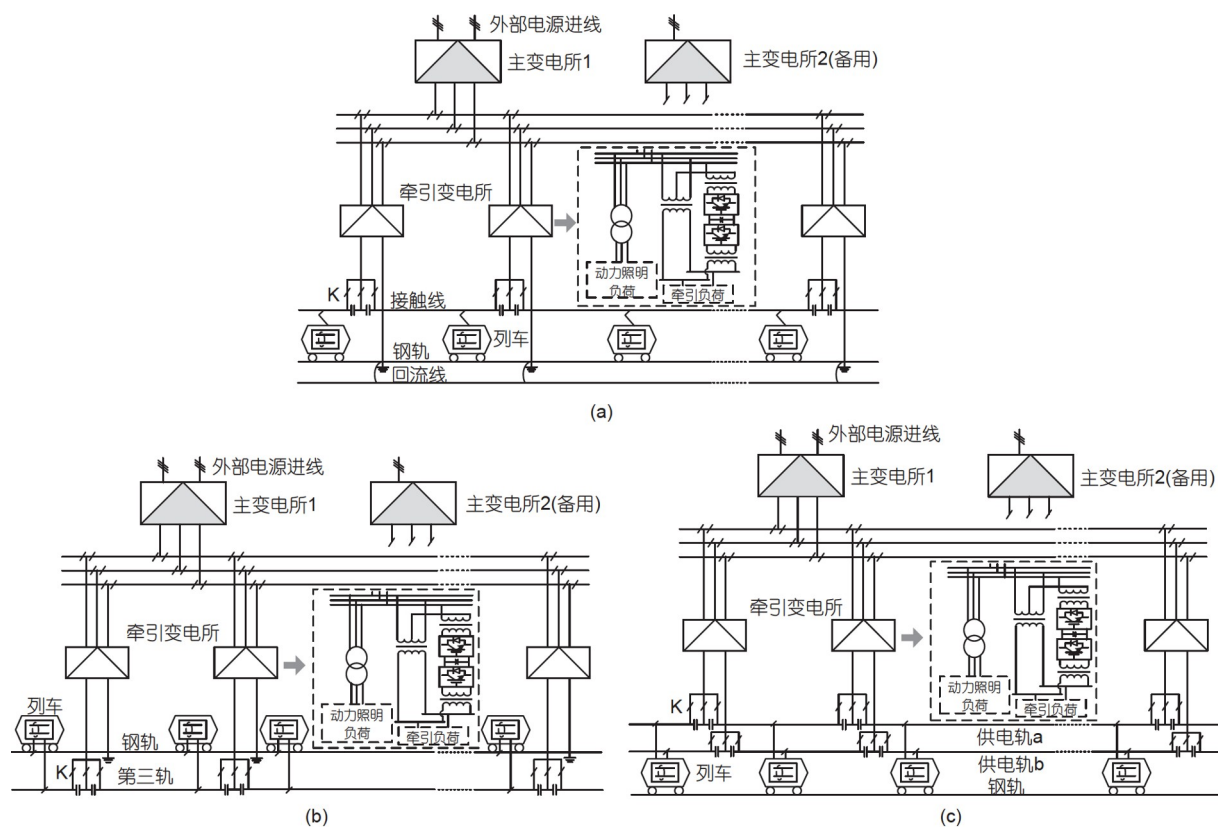


图 7 单相AC 3 kV牵引供电系统结构示意图. (a) 牵引网采用接触网方式; (b) 牵引网采用第三轨方式; (c) 牵引网采用第三轨和第四轨方式

Figure 7 Structural diagram of single-phase AC 3 kV traction power supply system. (a) Traction network adopting catenary; (b) traction network adopting the third rail; (c) traction network adopting the third and fourth rail.

的结构如图7(b)所示; 牵引网采用第三轨和第四轨构成的双供电轨形式的结构如图7(c)所示, 此时亦可建成受电犁-接触带形式, 其中接触带的两个供电轨形成单相回路, 可以消除地中电流。

5.2 三相AC 3 kV牵引供电系统

三相AC 3 kV供电系统由外部电源、主变电所、中压电缆、牵引变电所、三相牵引网等构成中压电缆+牵引网两级供电方式, 如图8所示。外部电源通过三相输电线将110或220 kV电能输送至主变电所, 其中主变压器将电能变换至35或66 kV并将变换后的电能输送至35或66 kV的中压电缆。中压电缆与线路平行, 将电能输送至各个牵引变电所。牵引变电所中设置电力配电变压器和牵引变压器, 分别将高电压等级电能转化至低电压等级电能, 分别供给动力照明供电系统和牵引供电系统。其中牵引变压器采用Yd11接线形式。

三相AC 3 kV列车的受电方式分为两类, 一类是

利用图5中的新型接触式受电装置, 对应的由第三轨(第1供电轨)、第四轨(第2供电轨)和钢轨构成三相牵引网; 另一类方式是利用图6中的受电犁, 对应的由供电轨a(第1供电轨)、供电轨b(第2供电轨)和钢轨构成三相牵引网。

不论单相还是三相AC 3 kV牵引供电系统, 其电缆和牵引网都是分段供电的, 为了及时、准确发现、切除故障和便于检修, 需引入分段保护与测控技术^[7,14], 可以将故障和检修影响缩小到最小范围。还可以在分段处的两个电分段之间设置带电中性段, 用于防止带电列车误入故障段, 造成二次故障。

单相和三相AC 3 kV牵引供电系统为中压电缆+牵引网两级供电方式, 尽管给列车直接供电的AC 3 kV的电压等级低于AC 25 kV, 但是上一级的供电电压高于AC 25 kV, 使得供电能力和供电距离大于AC 25 kV制式, 加上上一级采用电缆供电, 将比AC 25 kV接触网(相当于架空线)的供电能力更强。单相和三相

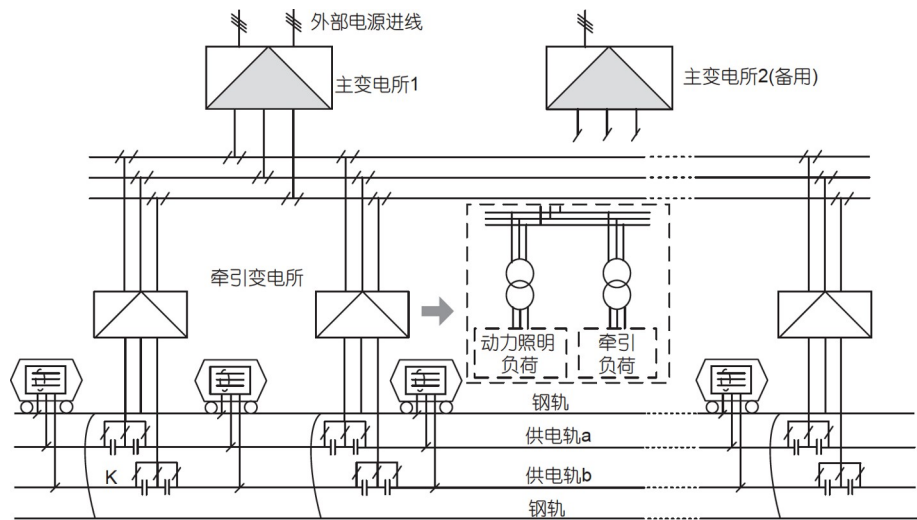


图 8 三相AC 3 kV牵引供电系统结构示意图

Figure 8 Structural diagram of three-phase AC 3 kV traction power supply system.

AC 3 kV制式的选用应因地制宜、因时制宜。考虑到AC 3 kV的技术优势，特别是城市轨道各条线路具有相对独立性，因此应在新建城市轨道交通线路时优先考虑AC 3 kV制式。对于DC 1.5 kV制式既有线改造，为了减少工程量，可优先选用单相AC 3 kV制式，而新建线路可在成功研发新型受电系统的基础上积极选用三相AC 3 kV制式。AC 3 kV制式也适于用于城际、市域、山地等独立线路。

6 实例分析

6.1 供电方案设计

以某城市轨道交通实际线路为例，正线长度为57.3 km，全线共设置车站10座，其中地下站4座、高架站6座，最大站间距14.95 km。该线路初始方案选用DC 1.5 kV制式，如图9(a)所示，线路车辆拟采用6编组B型地铁列车，车辆在高架段最高运行速度160 km/h，地下段最高运行速度120 km/h。本文研究单相和三相AC 3 kV供电方案，如图9(b)~(d)所示。

单相和三相AC 3 kV供电方案牵引网分别采用接触网方式及第三轨、第四轨和钢轨方式。单相和三相AC 3 kV列车牵引和制动特性曲线均参考6编组B型车，列车视在功率为6.8 MVA，功率因数为0.98。各方案典型参数设置如表2所示，不同方案的牵引网最低电压如表3所示，均满足列车正常工作电压要求。

由表2知，对于主变电所的数目，与DC 1.5 kV供电方案相比，当中压电缆电压等级为66 kV时，单相和三相AC 3 kV供电方案的主变电所均减少1处；当中压电缆电压等级为35 kV时，三相AC 3 kV供电方案的主变电所减少1处，单相AC 3 kV供电方案主变电所数目与DC 1.5 kV供电方案相同。对于牵引变电所的数目，与DC 1.5 kV供电方案相比，当中压电缆电压等级为66 kV时，单相和三相AC 3 kV供电方案的普通变电所数目均减少8个；当中压电缆电压等级为35 kV时，单相和三相AC 3 kV供电方案的牵引变电所数目均减少4个。

6.2 经济性对比分析

根据系统各运行阶段的设备投资、运行及更换成本等计算各个方案的全寿命周期成本，如表4所示。当中压电缆电压等级为66 kV时，与DC 1.5 kV供电方案相比，三相AC 3 kV和单相AC 3 kV供电方案的总成本分别减少8.976亿元和9.311亿元，总成本相对减少17.5%和18.24%；当中压电缆电压等级为35 kV时，与DC 1.5 kV供电方案相比，三相AC 3 kV和单相AC 3 kV供电方案的总成本分别减少4.413亿元和4.679亿元，总成本相对减少8.6%和9.16%。

6.3 技术性对比分析

分别从无电区(供电不间断性)、杂散电流及其危害、再生能量利用率、负序(三相电压不平衡)问题、

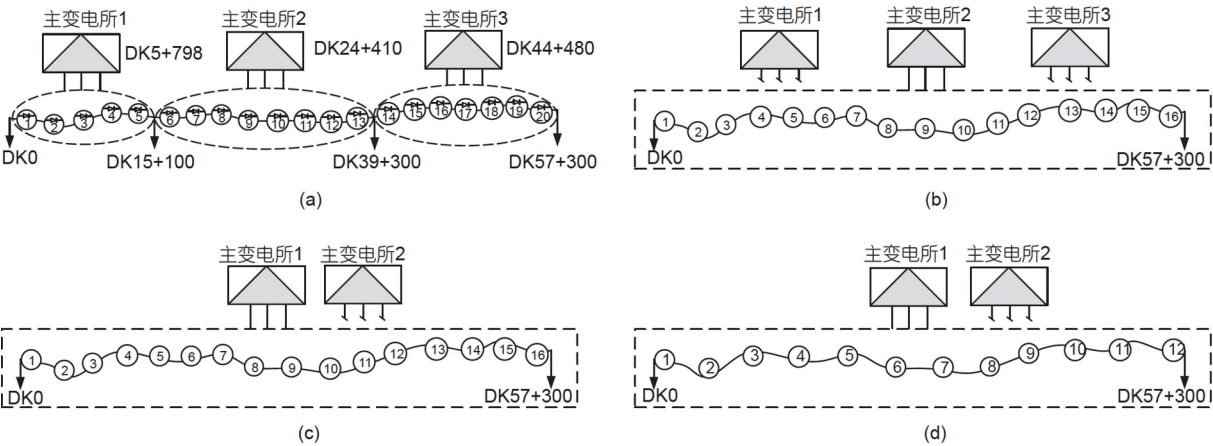


图 9 不同供电方案示意图. (a) DC 1.5 kV供电方案; (b) 单相AC 3 kV供电方案(中压电缆35 kV); (c) 三相AC 3 kV供电方案(中压电缆35 kV); (d) 单相/三相AC 3 kV供电方案(中压电缆66 kV)

Figure 9 Schematic diagram of different power supply schemes. (a) DC 15 kV power supply scheme; (b) single-phase AC 3 kV power supply scheme (medium voltage cable 35 kV); (c) three-phases AC 3 kV power supply scheme (medium voltage cable 35 kV); (d) single/three-phase AC 3 kV power supply scheme (medium voltage cable 66 kV).

表 2 典型参数设置

Table 2 Typical parameter setting

指标	中压电缆电压等级 (kV)	主变电所数目	牵引变电所数目	牵引网电压等级 (kV)
三相AC 3 kV	35	2	16	3
三相AC 3 kV	66	2	12	
单相AC 3 kV	35	3	16	
单相AC 3 kV	66	2	12	
DC 1.5 kV	35	3	20	1.5

表 3 牵引网最低电压统计结果

Table 3 Statistical results of minimum voltage of traction network

方案	中压电缆 (kV)	初期 (V)	近期 (V)	远期 (V)
单相AC 3 kV	35	2531	2449	2208
	66	2706	2662	2608
三相AC 3 kV	35	2713	2676	2616
	66	2825	2733	2718
DC 1500 V	35	1527	1502	1458

外部电源需求和逆变装置及列车再生制动失效风险等7方面对3种供电方案的技术性进行对比,如表5所示,结果表明了AC 3 kV供电方案在技术性方面的显著优势.

表 4 不同供电方案的全寿命周期成本(单位: 亿元)

Table 4 Life cycle cost of different power supply schemes (unit: 100 million yuan)

	中压电缆 (kV)	投资成本	运行成本	废弃成本	总成本
单相AC 3 kV	35	14.267	32.366	-0.257	46.376
	66	11.351	30.605	-0.213	41.744
三相AC 3 kV	35	14.621	32.284	-0.263	46.642
	66	11.696	30.602	-0.219	42.079
DC 1.5 kV	35	15.931	35.397	-0.273	51.055

7 结论

为了克服现行电流制式和供电方式的弊端和局限,本文提出的新型轨道交通工频AC 3 kV制式,包括列车牵引系统和牵引供电系统,在经济性和技术性方面具有显著优势,能够更好地适应更高速度、更大运量、更加安全可靠和更加绿色节能的新时代轨道交通的发展.

与传统动车组相比,AC 3 kV 列车牵引系统取消了车载牵引变压器,实现了列车轻量化,进一步提升了列车承载效率和节能率. AC 3 kV列车的牵引系统的核心装置是牵引变流器和牵引电机. 采用4.5 kV IGBT构建三电平拓扑的新型AC 3 kV列车牵引变流器,技术成熟,是目前条件下的最佳选择. 根据牵引变流器设计参数,牵引电机绝缘应该满足5 kV要求. 目前国

表 5 供电方案技术性对比
Table 5 Technical comparison of power supply schemes

指标	AC 3 kV		DC 1.5 kV
	三相	单相	
无电区	—	—	—
杂散电流电化学腐蚀等	—	—	至今不得根治, 对城市地下设施的寿命与安全构成严重威胁, 长远损失无法估量
再生能量利用率	能够最大限度直接利用再生制动能量	能够最大限度直接利用再生制动能量	难以直接或经济利用(需增设昂贵的逆变或储能设备, 且再生制动能量利用率有限, 存在死区)
供电容量	供电容量大, 能够满足大容量供电以及客运增加需求	供电容量大, 能够满足大容量供电以及客运增加需求	供电容量小, 逐渐不能满足城市客运增长的需求
负序问题	—	—	—
外部电源需求	较直流方案数目较少, 选址更加灵活	较直流方案数目较少, 选址更加灵活	较AC 3000 V单相交流牵引供电方案数目较多, 选址不够灵活
逆变装置及列车再生制动失效风险	—	—	故障退出或进入死区会使列车再生时网压升高, 甚至导致列车再生制动失效而启动空气制动, 安全风险高, 闸瓦磨损加剧、能耗增加

内主要的牵引电机生产厂家均具备该电压等级牵引电机的生产能力。

AC 3 kV牵引供电系统为中压电缆+牵引网两级供电方式, 无杂散电流, 供电能力更强, 最大限度实现了交流制式下的长距离不间断供电和再生制动能量的高效利用, 提高了主变电所选址的灵活性, 同时引入分段保护与测控技术提高系统供电的可靠性和灵活性。

新型工频AC 3 kV制式具有技术先进、性能优越、成熟可靠、工程造价低、运行成本低等显著优势, 是城市轨道交通的最佳选择, 也将为干线铁路与城市轨道交通互联互通的统一供电方式提供先导。同时, 为下一代新型智能轨道交通打下坚实基础, 值得对其关键技术进行更深入研究、开发。因此, 我们期待早日建成新型工频AC 3 kV轨道交通国家战略新兴产业示范线, 为世界轨道交通贡献中国制式。

致谢 郭锴、吴波、王辉、黄小红、解绍锋、靳守杰、曹虎、李鲲鹏、王斌、金琳等许多老师、同事、同学参加了与本文相关的研究工作, 在此深表谢意。

参考文献

1 Cao J Y. The way of railway electrification in China (in Chinese). People's Daily, 1956 [曹建猷. 我国铁路电气化的途径. 人民日报, 1956]
2 Cao J Y. Electrified Railway Power Supply System (in Chinese). Beijing: China Railway Press, 1983 [曹建猷. 电气化铁道供电系统. 北京: 中国铁道出版社, 1983]
3 Makwalt K G. Translated by Yuan Z F, He Q G. Electrified Railway Power Supply (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1989 [康·古·马克瓦尔特. 袁则富, 何其光, 译. 电气化铁路供电. 成都: 西南交通大学出版社, 1989]
4 Yu S W, Yang X S, Han L X, et al. Design Principle and Application of Urban Rail Transit Power Supply System (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008 [于松伟, 杨兴山, 韩连祥, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用. 成都: 西南交通大学出版社, 2008]
5 Xu L L, Liu W, Liao J, et al. The analysis on the measured traction energy consumption and braking energy consumption of urban rail transit (in

- Chinese). *J Railway Sci Eng*, 2016, 13: 1818–1824 [许伶俐, 刘炜, 廖钧, 等. 城市轨道交通列车牵引和制动能耗实测分析. 铁道科学与工程学报, 2016, 13: 1818–1824]
- 6 Li Q Z, Zhang J S, He W J. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction (in Chinese). *J China Railway Soc*, 1988, 4: 23–31 [李群湛, 张进思, 贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究. 铁道学报, 1988, 4: 23–31]
- 7 Li Q Z. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2014, 49: 559–568 [李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术. 西南交通大学学报, 2014, 49: 559–568]
- 8 Li Q Z. Industrial frequency single-phase AC traction power supply system and its key technologies for urban rail transit (in Chinese). *J Southwest Jiaotong Univ*, 2015, 50: 199–207 [李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术. 西南交通大学学报, 2015, 50: 199–207]
- 9 Lian J S. *An Introduction to Electric Drive Locomotives* (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2001 [连级三. 电传动机车概论. 成都: 西南交通大学出版社, 2001]
- 10 Li Q Z, Wu B, Guo K, et al. A motor vehicle power supply transmission system, AC-DC-AC converter and control method (in Chinese). China Patent, 202111372257.6, 2021-12-17 [李群湛, 吴波, 郭锴, 等. 一种动车供电传动系统、交直交变流器及其控制方法. 中国专利, 202111372257.6, 2021-12-17]
- 11 Wu J Q. *Pantograph and Catenary System* (in Chinese). Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010 [吴积钦. 受电弓与接触网系统. 成都: 西南交通大学出版社, 2010]
- 12 Li Q Z. A contact-type collector device at the bottom of a power supply rail (in Chinese). China Patent, 201910623092.1, 2019-9-27 [李群湛. 一种供电轨下部接触式集电装置. 中国专利, 201910623092.1, 2019-9-27]
- 13 Li Q Z. A train power collection device (in Chinese). China Patent, 201610880589.8, 2018-11-20 [李群湛. 一种列车集电装置. 中国专利, 201610880589.8, 2018-11-20]
- 14 Li Q Z. Unified traction power supply mode for trunk railway and urban rail transit (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2018, 48: 1179–1189 [李群湛. 论干线铁路与城市轨道统一牵引供电方式. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1179–1189]

Novel rail transit power frequency AC 3 kV mode: A train traction system and traction power supply system

LI QunZhan

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

With the development of urban rail transit in the new era of higher speed, greater traffic volume, more safety, reliability, and greener energy savings, the current modes of current traction power supply and the types of trains, including the direct current mode and the power frequency single-phase alternating current (AC) mode, cannot well meet the needs of their good development. Therefore, a novel rail transit power frequency AC 3 kV power supply mode is proposed, which mainly involves a train traction system and a traction power supply system. Considering the topological structure of the train traction converter and the characteristics of the core device IGBT, the voltage level of the novel current mode was determined to be AC 3 kV. The AC 3 kV train traction system is proposed. It is divided into a single-phase system, a three-phase system, and a single-phase/three-phase compatible system. Compared with the traditional motor train unit, the onboard traction transformer is no longer set on the train to realize the lightweight of the train. AC 3 kV single-phase and three-phase power receiving systems are proposed. The single-phase power receiving system includes a pantograph with catenary mode and a power receiving shoe with a power supply rail (third rail), and the three-phase power receiving system includes a power receiving shoe with third and fourth rail modes and an electric plow with a contact band mode. A novel type of AC 3 kV traction power supply system is proposed. It is divided into two systems: single-phase and three-phase traction power supplies. The power frequency AC 3 kV and DC 1.5 kV schemes are studied on a certain line, and the research results show that the power frequency AC 3 kV power supply scheme has significant advantages in terms of economy and technology.

rail transit, train traction system, traction power supply system, power receiving system, power frequency AC 3 kV

doi: [10.1360/SST-2022-0096](https://doi.org/10.1360/SST-2022-0096)