论干线铁路与城市轨道统一牵引供电方式

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: 2018-03-02; 接受日期: 2018-07-27; 网络版发表日期: 2018-09-20

摘要 在研究干线铁路同相供电和城市轨道工频交流供电的基础上, 为了实现干线铁路和城市轨道无分相、不间断供电和彼此互联互通, 提出了一种新型牵引供电系统和干线铁路与城市轨道相统一的牵引供电方式. 该新型牵引供电系统由主变电所和牵引供电网组成, 牵引供电网由供电网、牵引所和牵引网组成, 供电网和牵引网实行梯级供电. 研究了相邻主变电所之间的牵引供电网的连通方式及其抑制均衡电流的效果; 提出了一种新的以接触带实现接触供电与以受电犁实现集电的方案; 讨论了接触带与受电犁的优越性; 分析了接触带的电压等级及主要影响因素; 研究了主变电所牵引、电力单独供电及混合供电的实施方案; 阐述了牵引供电网的分段保护与状态辨识技术. 与传统牵引供电系统相比, 新型牵引供电系统优势显著, 值得进行更深入的研究.

关键词 干线铁路, 城市轨道, 牵引供电系统, 接触供电方式, 集电方式, 牵引与电力混合供电, 分段保护

1 引言

1.1 干线铁路的不间断供电

干线铁路牵引供电系统普遍采用单相工频交流制, 通过牵引网为列车牵引负荷供电^[1~3]. 为使单相的牵引负荷在三相电网中尽可能均匀分配, 避免造成过量不平衡, 牵引网采用了轮换相序、分区供电的方案. 分区处的相邻供电分区之间用分相绝缘器分割, 形成电分相, 也称分相. 电分相造成牵引供电间断, 是牵引网的最薄弱环节, 最容易引发列车事故, 影响供电和行车安全.

取消电分相、实现连续不间断供电是牵引供电的终极目标^[4~7].

取消电分相分两种情形: 一种是取消牵引变电所

出口处的电分相, 可采用单相牵引变压器或与之配套的同相补偿技术, 称为同相供电^[4~7]; 另一种是取消分区所处的电分相, 需实施双边供电. 双边供电因牵引网与电网并联而在牵引网中产生一个电流分量, 称为均衡电流. 实施双边供电的关键是减小均衡电流, 使其达到最小或允许的程度.

1.2 干线机车和动车的牵引传动

干线铁路机车、动车上的牵引传动系统由车载牵引变压器、牵引变流器和牵引电机串联组成^[8]. 交直机车的牵引传动系统由车载牵引变压器、牵引整流器和直流牵引电机串联组成, 交直交机车和动车的牵引传动系统则由车载牵引变压器、交直交变流器和交流牵引电机串联组成. 交直机车的车载牵引变压器除了

引用格式: 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

Li Q Z. Unified traction power supply mode for trunk railway and urban rail transit (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1179–1189, doi: [10.1360/N092017-00184](https://doi.org/10.1360/N092017-00184)

降压(将接触网27.5 kV降至牵引整流器所需的低压)外还有极其重要的调压调速的功能,但是,交直机车早已停产,而现行的交直机车和动车则采用三相变压变频调速,其车载牵引变压器已无需调压而只剩降压功能,还因是串联元件而降低牵引传动系统的可靠性,于是车载牵引变压器占用列车宝贵空间、增加轴重、影响功率密度等缺点愈加显现,实有弃之的必要.现行机车和动车牵引传动系统的电压较低,一般在1~2.75 kV之间.提高机车和动车牵引传动系统电压,特别是达到27.5 kV接触网电压来取消车载牵引变压器,像ABB公司那样,不仅技术上有困难,还可能增加轴重和空间,经济上也不划算.因此,取消车载牵引变压器技术经济兼优的方案是像现行地铁和轻轨那样由供电系统直接给列车牵引传动系统供电,这也就意味着供电电压的降低.

1.3 城市轨道的交流供电

以地铁和轻轨为主要代表的城市轨道交通具有行车密度大、站间距短、启停频繁的突出特点.采用直流供电系统的主要优点是没有电分相,列车运行顺畅,而缺点是存在地中电流,称为杂散电流或迷流.杂散电流对地下金属管线产生的电化学腐蚀等不良影响是长期的,是不容忽视的^[9];同时,杂散电流的防护措施复杂,代价大,效果有限;另外,城市轨道列车已广泛应用的交流牵引电机具有良好的制动能量再生能力,而直流供电系统储存这些电能或反馈这些电能到交流电网,或者技术上有缺陷,或者经济上代价高,不像交流供电系统那样可以直接把这些电能送回电网,用电和发电一样简单、方便,安全可靠,节能环保.这些都奠定了城市轨道采用交流供电的必要性.文献^[10]提出了一种城市轨道交流供电系统方案,可以简化系统,根治杂散电流腐蚀,在一定范围内不设电分相,确保运行顺畅,具有较好的经济性和更高的可靠性.

因为地铁、轻轨等城市轨道受空间限制,不论直流供电还是交流供电,都需采用较低电压等级.

1.4 干线铁路与城市轨道牵引供电的统一与互联互通

综上所述,无论是干线铁路取消分区所电分相、实现连通供电,省去车载牵引变压器而给机车或动车牵引传动系统直接供电,还是城市轨道实施交流供电,

以及进一步使干线铁路与城市轨道实现同相和统一电压等级供电并连通,便于干线铁路与城市轨道互联互通和乘客换乘,所有这些技术要求的一个共同指向是:需要一个低电压供电系统,不走日本、欧洲等国为了不同供电制式的互联互通而制造交直两用列车的老路,从而达到一个新的高度.

在此,一个与电网相关的重要指标是均衡电流,考虑到俄罗斯干线铁路一直采用双边供电且其均衡电流较大,以及世界各国广泛运行的城市轨道直流供电在负荷工况下也存在均衡电流,并且是被电网接受的,那么,可以设想如果能使均衡电流降至最小或允许的程度,干线铁路与城市轨道供电方式的统一和互联互通不仅给轨道交通带来极大便利,还能促进与电网的和谐发展.

2 新型牵引供电方案

干线铁路牵引供电系统包括牵引变电所和牵引网,其中牵引网又包括接触网和钢轨,是单相制;干线铁路电力供电由自闭、贯通线路承担,是三相制,且独立于牵引供电系统.城市轨道的牵引供电和电力(动力照明)供电由中压网络完成,牵引供电和动力照明供电可以用单独中压网络亦可以用混合系统中压网络,其中中压网络采用三相电缆供电.

可将干线铁路与城市轨道统一起来的新的供电方式需兼顾大容量供电与低电压直接接触供电的双重需求,因此提出由较高电压的供电网与较低电压的牵引网相结合的阶梯供电方案:一种新型通用牵引供电系统.该系统由主变电所和牵引供电网组成.牵引供电网由供电网、牵引所和牵引网组成.供电网包括供电线、回流线及开关;牵引所包括牵引变压器、主接线及开关;牵引网是给列车直接接触供电的电路,由接触供电线、接触回流线及开关组成.

主变电所可以单独用于牵引供电,亦可用于牵引和电力(动力照明)混合供电,参考城市轨道中压网络,主变电所的主牵引母线(单相)额定(线间)电压可以取35 kV(2×17.5 kV),而参考干线铁路,亦可取27.5 kV(2×13.75 kV)或 2×27.5 kV.

2.1 牵引供电网与连通方式

如图1所示,记两个相邻的主变电所分别为SS_i和

图1 牵引供电网及连通方式示意图

SS_j ; 主变电所 SS_i 次边馈出到牵引供电网中供电网的供电线 PS_i 和回流线 PR_i , 再经牵引所的牵引变压器, 如 T_{i1} 和 T_{i2} , 连接到牵引网的接触供电线 CS_i 和接触回流线 CR_i , 即牵引变压器 T_{i1} 和 T_{i2} 原边两端子分别连接到供电线 PS_i 和回流线 PR_i , 次边两端子分别连接到接触供电线 CS_i 和接触回流线 CR_i , 设同名端在同一侧; 供电线 PS_i 和回流线 PR_i 在牵引所内经开关B分段, 接触供电线 CS_i 和接触回流线 CR_i 在牵引所内经开关K分段; 牵引网的接触供电线 CS_i 和接触回流线 CR_i 给列车L供电; R为钢轨; 主变电所 SS_j 亦然.

连接于同一电网的两相邻主变电所之间的牵引供电网的电压相位相同, 同样参见图1, 接触供电线 CS_i 和接触回流线 CR_i 之间的电压相位与接触供电线 CS_j 和接触回流线 CR_j 之间的电压相位相同则将相邻的牵引网连通, 即相邻牵引所的接触供电线 CS_i 和接触供电线 CS_j 连通, 接触回流线 CR_i 和接触回流线 CR_j 连通, 即可实现无分相、不间断供电.

牵引所的间隔可根据实际供电需求决定, 一般为2~10 km为宜, 而间隔较长时, 为检修方便, 可设开关K进行分段.

牵引所的牵引变压器原边绕组中点抽出形成供电网中性点, 用于接地, 以抑制系统过电压.

显然, 容易将以上技术方案推广到多个主变电所情形, 以适于更长的电气化铁路.

供电网的供电线和回流线可以是架空线, 也可以是电缆, 应优先选择电缆, 特别是双芯电缆.

按现行规范, 当一主变电所故障时, 应由相邻主变电所供电, 这种方式称为越区供电; 当连通两个相邻主变电所 SS_i 和 SS_j 的牵引网的供电能力满足要求时, 可直接进行越区供电, 但当要求更强的供电能力时, 则需在图1基础上进一步在两相邻主变电所 SS_i 和 SS_j 牵引供电网末端牵引所之间增加供电线和回流线, 一个方案是: 在牵引供电网末端的两个牵引所经开关B将增加的供电线和回流线与原有的供电线和回流线分别连通; 正常情况下, 该开关打开, 越区供电时, 该开关闭合. 另一方案是: 在增加的供电线和回流线中间设置开关所SP, 如图2所示. 在开关所SP中, 经开关B分别将增加的供电线和回流线分割, 正常情况下, 该开关B打开, 越区供电时, 开关B闭合.

2.2 牵引网的接触供电与集电方式

现行干线电气化铁路的牵引网采用架空接触网+钢轨(走行轨)接触供电方式^[11], 地铁、轻轨等城市轨道的牵引网采用架空接触网+钢轨方式或接触轨(第三轨)+钢轨接触供电方式^[9], 对应图1, 架空接触网或接触轨为接触供电线, 钢轨R为接触回流线. 这种牵引网均为“一线一地”供电方式. 显然, “一线一地”供电方式的优点是利用钢轨回流功能, 使系统结构非常简单, 但

图2 牵引供电网越区供电示意图

缺点也很突出: 因为钢轨被用作牵引电流的回流线, 并且由于技术或经济上的诸多因素制约, 钢轨不完全绝缘于大地, 因此, 牵引电流将经钢轨向大地泄露、扩散, 形成杂散电流。特别是地铁、轻轨等的牵引供电采用直流制, 它产生的杂散电流对道床钢筋结构、隧道内钢筋结构和沿线的金属管线等设施都将产生电化学腐蚀, 从而影响这些构筑物和金属设施的安全和使用寿命, 虽然采取了排流保护、走行轨降阻、杂散电流收集和管道外防腐涂层等杂散电流防护措施, 有较大的资金投入, 但仍不能从根本上消除杂散电流及其长期腐蚀的影响。干线电气化铁路采用AT和BT等供电方式来吸上杂散电流, 但也无法根除。同时, 钢轨回流对地面产生的电位差将形成跨步电压, 严重时威胁人身安全, 也需要采取必要的防范措施。另外, “一线一地”供电方式需要占有较大的专用空间, 特别是架空接触网需要增大隧道断面, 将增加施工难度和成本。

现行接触网分为柔性接触网和刚性接触网。干线电气化铁路多采用受电弓与柔性接触网集电方式, 城市轨道交通除此方式外, 还采用受电弓与刚性接触网集电方式, 此外, 还有受电靴与接触轨接触集电方式。这种受电弓与接触网或受电靴与接触轨的接触集电方式也称为单极集电方式, 而另一极的集电是通过装有接地装置的列车轮对与钢轨滚动接触完成的。柔性接触网与受电弓系统属于柔性系统, 通常除了承受受电弓的接触力, 还要承受很大的张力。接触轨、刚性接触网与受电弓系统称为刚性系统, 几乎不承受张力, 只承受接触力。相比柔性系统, 刚性系统具有结构简单、载流量大、可靠耐用等显著优点, 但因结构形式、悬挂方式、跨距长短及与受电弓(受电靴)的动力性能匹配问题还没有很好解决, 同时, 列车在运行中产生的振动会通过受电弓或受电靴直接传递到接触网或接触轨, 影响受电弓与接触网或受电靴与接触轨的接触集电性能, 这些因素的影响在高速运行时尤为显著, 从而严重制约了刚性系统优势的良好发挥。除了奥地利采用刚性悬挂的铁路运行速度达230 km/h、试验速度达到了302 km/h之外, 其他尚无高速铁路使用刚性系统的实例。

为此, 提出一种受电犁和接触带实现的新的接触供电与集电方式。对应图1, 牵引网由接触带实现, 接触带的供电轨和回流轨分别担当牵引网的接触供电线和接触回流线。接触带的供电轨和回流轨不再悬挂安

装而是沿绝缘底座固定安装。与之配套的是称为受电犁的一种双极集电装置。受电犁能化解列车在运行中产生的振动, 从而保持与接触带的良好接触, 使供电与集电性能和刚性系统的优势得到良好发挥, 受电犁与接触带的接触供电与集电性能也不再受原来的跨距和悬挂结构制约, 更适于高速铁路运用, 同时彻底消除杂散电流, 避免人员接触和跨步电压, 大大提高供电安全性和可靠性。另外, 为了运行与检修安全, 列车车体应通过电刷连接钢轨。

如图3所示, 接触带由供电轨、回流轨、绝缘底座和绝缘护罩组成。接触带在两个钢轨之间的道床上沿钢轨延伸方向连续铺装。供电轨和回流轨的安装高度高于钢轨的顶端。在机车或动车的动力转向架处安装受电犁。受电犁由集电臂和回流臂构成。集电臂由集电杆及集电极构成, 回流臂由回流杆及回流极构成。集电杆、回流杆用轻量化绝缘材料制成, 集电极、回流极用耐磨导电材料制成。集电极与供电轨接触, 回流极与回流轨接触, 集电杆和回流杆中分别设有电缆, 电缆将集电极、回流极与列车牵引传动系统连接, 构成机车或动车的牵引供电回路。

具体说来, 受电犁安装在动力转向架端头中部增设的横梁上, 横梁的下侧设有两组轴承座, 集电杆和回流杆的顶端分别通过与列车纵向平行的转轴与轴承

图3 接触带与受电犁结构示意图。1, 供电轨; 2, 回流轨; 3, 绝缘底座; 4, 绝缘护罩; 5, 钢轨; 6, 道床; 7, 动力转向架; 8, 集电杆; 9, 集电极; 10, 回流杆; 11, 回流极; 12, 牵引传动系统; 13, 轴承座; 14, 转轴; 15, 限制器; 16, 增压弹簧; 17, 限制片

座铰接;在两组轴承座之间设有呈倒丁字形的限制器,其上部固定于横梁的下侧中间,下部悬于集电杆与回流杆之间,两侧均留有间隙,限制器用以限制集电杆和回流杆在过道岔时过分靠近或短路;增压弹簧的两端分别在集电杆和回流杆的中部位置固定,用于产生集电杆对供电轨和回流杆对回流轨的接触力,该接触力的大小可根据建模计算得到,按既有经验,一般在70~100 N之间;集电极的固定端与集电杆的底端铰接,集电极的自由端与供电轨的一侧接触;回流极的固定端与回流杆的底端铰接,回流极的自由端与回流轨的一侧接触;集电杆和回流杆的底端均设有限制片,以限制集电极和回流极的超范围活动。

为了使列车不断电通过道岔,需要采取一些措施,参见图4。在设有集电臂和回流臂的动力转向架A的邻近动力转向架B上另设一组辅助集电臂和辅助回流臂,辅助集电臂与集电臂之间由辅助供电电缆连通、辅助回流臂和回流臂之间由辅助回流电缆连通,其间隔长度相同,且大于道岔区段的长度。集电臂和辅助集电臂、回流臂和辅助回流臂同时分别与供电轨和回流轨保持接触和集电。

供电轨、回流轨及绝缘底座在道岔区段中断,中断的供电轨和回流轨分别由供电电缆和回流电缆连通,供电轨和回流轨中断的长度大于等于道岔区段的长度。车辆的集电臂、辅助集电臂、回流臂、辅助回流臂在钢轨的道岔上方通过,形成立交,互不影响,保持供电的连续性。

绝缘底座和绝缘护罩具有一定的刚性和塑性,以选用玻璃钢为宜。绝缘底座的刚性应足以支撑供电轨和回流轨以及来自与之摩擦的集电臂和回流臂的压力。利用绝缘底座和绝缘护罩的塑性,供电轨和回流轨可以牢固地嵌放于绝缘底座和绝缘护罩的结合部。

与传统的“一线一地”方式相比,接触带的缺点是

图4 不断电过道岔电路构造示意图。18, 辅助集电臂; 19, 辅助回流臂; 20, 辅助供电电缆; 21, 辅助回流电缆; 22, 供电电缆; 23, 回流电缆

需要多加一条回流轨以及绝缘底座和绝缘护罩,但带来的益处较多,如:与车辆和钢轨(地)相绝缘,形成独立的牵引供电回路,不产生杂散电流和地面跨步电压,保护人身和设施安全,亦可有效避免短路故障,提高供电可靠性;接触轨和回流轨的绝缘支撑大大增强绝缘性能,在同样的空间限制内可以提高供电电压等级和系统供电能力;交流制式下,接触带形成电缆效应,具有电缆特性,因为接触轨和回流轨之间的互感和分布电容大大增加,自然功率和供电能力较接触线、接触轨等架空线模式大大增加;可有效利用钢轨之间和车辆底部的空间,即不额外占用专用空间,节省或释放隧道净空,减少一次性土建费用;其结构更适于大截面安装,因此可以以低电压、大电流方式满足大容量牵引供电的需求;既适用于城市轨道交通,也适用于干线铁路;地面运行时不会对景观造成不良影响,彻底消除架空接触网对轨道上部再利用的干扰。

可见,接触带用多加一条回流轨以及绝缘底座和绝缘护罩的代价换取如上益处是值得的。

2.3 牵引供电网电压等级

供电网应首选双芯电缆,对应城市轨道交通35 kV中压网络,其双芯电缆额定电压可选 2×17.5 kV,对应干线铁路则可选 $2 \times 13.75(27.5)$ kV或 2×27.5 kV。当相邻主变电所的牵引供电网需要越区供电而连通时,供电网的电压等级应一致。

牵引网电压等级的选择是一个新的课题,需要考虑的因素较多,诸如:(1)钢轨之间和列车底部的绝缘空间有限,电压不宜过高,例如不高于11 kV;(2)目前,高铁动车、大功率货运机车、地铁车辆牵引传动系统的电压都较低,一般在1~2.75 kV,考虑到电力电子技术发展和列车牵引传动系统容量需求及车内特殊环境,今后发展也不宜过高,但提高1~2倍是适宜的;(3)供电容量应满足现行高铁一组大列的需要,如不小于20 MVA;(4)供电轨、回流轨的载流量应不低于现行刚性悬挂,如4000 A;等等。再考虑现行干线铁路牵引母线额定电压为27.5 kV,若与新的牵引网电压之比取整数,则接触带电压等级可优先考虑5.5 kV,并论证11 kV等级,进行比选。

2.4 均衡电流

均衡电流是牵引网与电网并联而在牵引网中产生

一个电流分量, 为方便, 牵引网参数可归算至电网来计算、分析. 设变比=电网与牵引网额定电压之比, 均衡电流反比于牵引网阻抗和变比平方的乘积. 为减小均衡电流, 首先, 可以在牵引馈线中串接电抗器以增加牵引网阻抗^[7], 但注意到, 若牵引变电所进线电网电压为110 kV而牵引网采用55 kV AT供电方式(变比=110/55=2)时, 欲将其中的均衡电流减少到应有的程度(如1%以下)是做不到的, 其原因是变比太小, 串接电抗器的阻抗取值因受到电压损失限制而不能过大, 归算至电网侧的阻抗(即变比平方倍的牵引网阻抗)仍不够大; 因此, 降低均衡电流最有效的途径是增加变比, 即或者提高进线电网电压, 或者降低牵引供电电压. 若忽略不同电压等级的线路(有名值)阻抗的差异, 定义均衡电流占比=均衡电流与牵引网和电网并联而在电网中流过的电流分量之比, 那么, 均衡电流占比=变比平方的倒数.

结合图1, 设主变电所原边电网与次边供电网的变比为 n , $n>1$, 供电网与牵引网的变比为 m , $m>1$, 如果没有图中的牵引网, 单独用供电网连通直接给列车供电, 其均衡电流占比= $1/n^2$, 而如果没有图中的供电网, 单独用牵引网连通直接给列车供电, 则牵引网均衡电流占比= $1/(nm)^2$, 即相比之下可以将均衡电流进一步缩小 m^2 倍. 例如, 单独用供电网连通供电时, 若主变电所进线电网电压为110 kV, 次边供电网(相当于现行牵引网)首端(母线)额定电压为27.5 kV, 变比 $n=110/27.5=4$, 则该供电网与110 kV输电线路并联的均衡电流占比= $1/16=6.25\%$, 很大; 若主变电所进线电网电压为220 kV, 变比 $n=220/27.5=8$, 则该供电网与220 kV输电线路并联的均衡电流占比= $1/64=1.56\%$, 明显减小, 但仍 $>1\%$, 而单独用牵引网连通直接给列车供电时, 仍取牵引网(接触带)首端额定电压为5.5 kV, 则变比 $m=27.5/5.5=5$, 相比单独用供电网连通直接给列车供电时的均衡电流缩小 $5^2=25$ 倍, 即主变电所进线电网电压为110 kV时, 均衡电流占比= $1/400<<1\%$, 很小, 而主变电所进线电网电压为220 kV时, 均衡电流占比= $1/1600<<1\%$, 极小, 几乎可以忽略. 当然, 对于图1所示阶梯供电方式的牵引供电网, 即供电网给牵引网供电, 牵引网连通再给列车供电, 那么, 其均衡电流占比取决于两相邻主变电所之间的供电网长度和牵引网长度的比例. 例如, 两相邻主变电所之间供电网长度是牵引网长度 $2/3$, 那么, 均衡电流占比为 $3/[2n^2+(nm)^2]$, 当主变

电所进线电网电压为110 kV时, $n=110/27.5=4$, $m=27.5/5.5=5$, 均衡电流占比= $3/432=0.69\%<1\%$, 当主变电所进线电网电压为220 kV时, $n=220/27.5=8$, $m=27.5/5.5=5$, 均衡电流占比= $3/1728=0.17\%<<1\%$, 均衡电流均可达到非常好的抑制效果.

前面提到, 俄罗斯干线铁路一直采用双边供电^[3], 即27.5 kV牵引网连通直接给列车供电, 当牵引网与电网并联时, 其均衡电流较大, 例如, 进线电网电压为110 kV而牵引网采用55 kV AT供电方式时, 变比 $n=110/55=2$, 则该牵引网与110 kV输电线路并联的均衡电流占比= $1/4=25\%>>1\%$, 非常大, 而牵引网采用27.5 kV直供方式时, 变比 $n=110/27.5=4$, 则该牵引网与110 kV输电线路并联的均衡电流占比= $1/16=6.25\%>>1\%$, 也很大. 另外, 世界各国广泛运行的城市轨道交通直流供电在负荷工况下也存在均衡电流, 并且被电网接受. 这些情况在研究均衡电流占比允许值时值得借鉴.

当然, 均衡电流与电网的供电方式及运行方式有关. 研究表明, 当各级变电站经输电线给各个主变电所形成树形供电构造时可以彻底消除均衡电流.

均衡电流的另一种描述的方式是穿越功率, 即牵引网与电网并联而在牵引网中流通的功率分量. 显然, 上面定义的均衡电流占比就等于穿越功率占比, 其余的分析方法和结论也相同.

总之, 减小和消除均衡电流或穿越功率需要电网和牵引供电系统相互配合, 篇幅所限, 另文讨论.

3 主变电所供电方案

分牵引独立供电和牵引、电力(动力照明)混合供电两种情形.

3.1 独立的牵引供电方案

主变电所应首选单相主变压器, 当负序过大而不能满足国家标准^[12]规定时, 最佳选择是在单相主变压器基础上辅以同相补偿技术, 构成单相组合式同相供电变电所, 如图5所示. 该组合式同相供电变电所由主变压器MTT、同相补偿装置CPD组成, 其中同相补偿装置CPD包括高压匹配变压器HMT、交直交变频器ADA、牵引匹配变压器TMT以及交流电抗器L等^[7], 主牵引母线BB1和BB2经馈线分别连接图1所示牵引供电网中供电网的供电线和回流线.

图5 单相组合式主变电所接线示意图

主变电所还要考虑备用设备,如图6所示,在图5基础上增加了备用主变压器(MTTB)、备用高压匹配变压器(HMTB)。为节约用地,主变压器与高压匹配变压器可共箱制造。同相补偿装置采用 m/n 系统,即 n 个单元中 m 个单元工作、 $n-m$ 个备用,图中为 $3/4$ 系统,或 $2/4$ 系统。

图6 有备用的组合式主变电所接线示意图

3.2 牵引与电力(动力照明)混合供电方案

为了减少主变电所占地、简化系统结构,提出一种牵引和电力(动力照明)混合型主变压器接线方案,如图7所示。原边三相绕组接成星形,即原边三相绕组AX, BY, CZ的尾端X, Y, Z相接形成中点O, 原边三相绕组AX, BY, CZ的首端A, B, C引出接三相电网。次边三相绕组ax, by, cz接成 Δ 形,即绕组ax首端a联至绕组cz尾端z形成端子r, 绕组by首端b联至绕组ax尾端x形成端子s, 绕组cz首端c联至绕组by尾端y形成端子t; 端子r, s, t形成三相对称接线,用于电力(动力照明)三相对称负荷供电;在次边绕组by的中点抽出端子d, 端子r与端子d构成端口rd, 端口rd与端口st形成两相对称接线,用于牵引负荷供电。牵引负荷供电是单相供电或同相供电。与图5对应,同相供电时,端口st直接联接主牵引母线BB1和BB2, 端口rd联接同相补偿装置(CPD)。其中同相补偿装置(CPD)由单相降压变压器(可以省略)、交直交变流器和单相升压变压器组成。单相降压变压器原边联接端口rd, 次边联接交直交变流器, 交直交变流器将电压旋转 90° , 再经单相升压变压器并接到主牵引母线BB1和BB2。主牵引母线BB1和BB2经馈线分别连接图1所示牵引供电网中供电网的供电线和回流线。

现行城市轨道交通电力(动力照明)中压网络采用

图7 牵引电力混合型同相供电接线原理示意图

35 kV三相电缆供电, 干线铁路电力贯通线则采用10 kV三相电缆供电。考虑牵引与电力的兼容和干线铁路与城市轨道的兼容, 建议铁路电力(动力照明)考虑27.5或35 kV三相电缆方案。

3.3 主变压器与同相补偿装置容量计算

同相补偿广义上应为对称补偿。依文献[6]所述, 对称补偿是包括负序补偿和无功补偿的三相-单相相对称变换, 由于所使用的交直交列车的功率因数接近1, 无功补偿的目标已经达到, 负序补偿成为主体。

若记主变电所进线电网短路容量为 $S_d(\text{MVA})$, 国家标准[12]规定的三相电压不平衡度限值(95%概率大值, 或最大值为 $u_e(\%)$, 则可得负序功率允许值 $S_e(S_e = u_e \times S_d / 100)$ 。由供电计算得牵引负荷过程 $S_L(t)$, 提取与国标规定值(95%概率大值或最大值)对应的负荷功率 $S(\text{MVA})$, 设负荷功率因数等于1, 对于独立牵引供电, 参见图5, 根据文献[7]可得主变压器计算容量 S_T 和同相补偿装置计算容量 S_C 为

$$\begin{bmatrix} S_T \\ S_C \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_e \\ S \end{bmatrix} \quad (1)$$

若同相补偿装置计算容量 $S_C < 0$, 则表示不用同相补偿装置, 只用单相主变压器即可。

可以证明, 以上同相补偿装置计算容量的计算方法适于图6所示的独立的牵引供电主变电所, 也适于图7所示的牵引与电力混合供电方案, 而其主变压器计算容量则应考虑牵引负荷与电力(动力照明)负荷的联合作用。

最后根据主变压器和同相补偿装置的过负荷特性进一步确定其安装容量。

4 牵引网的分段保护与状态辨识

较之架空线, 电缆具有输电能力强、输电距离长的特点。如果供电网采用双芯电缆, 加之接触带又具有电缆特性, 与现行电气化铁路牵引供电系统相比, 新型牵引供电系统的供电能力和主变电所的供电距离(主变电所间距)会大大增加。同时注意到, 虽然接触带可以有效避免短路故障, 供电网的电缆故障率又远远低于架空线, 但牵引供电网的结构比较复杂, 双线上、下行并联和考虑供电网备用时的结构更为复杂, 一旦故障发生而不被及时发现就会造成严重后果。为及时发现故障并避免一处发生故障导致系统故障而降低系统可靠性和可用度, 针对高速铁路全并联AT供电系统的研究和试验结果[7,13]表明, 分段供电及其保护对及时发现和切除故障, 限制故障在最小范围进而把故障影响降低到最低程度是非常有效的。

在此, 供电网的供电线、回流线和接触带的供电轨、回流轨可分别分段, 亦可集中于一处分段, 为方便起见, 集中分段宜设在牵引所。

牵引所 i 包括供电线、回流线(双芯电缆)进线及其断路器、牵引变压器、牵引母线、馈线、馈线断路器 K_{i1} 、分馈线及其断路器等。图8给出牵引所 i 的供电轨CS(回流轨CR)分段示意图。牵引所 i 出口应就近设置供电轨CS(回流轨CR)分段器 S_i , 分段器 S_i 串接在供电轨CS(回流轨CR)中, 能使列车不间断带电通过, 因此牵引所 i 还包括与分段器 S_i 并联的分馈线断路器 K_{i1} , K_{i2} 及其电流互感器, 以及连接于分段器 S_i 处的电压互感器。回流轨CR分段可以参照供电轨CS进行, 但考虑到供电轨与回流轨之间短路时切除其中一条即可, 因此可以在其中一条(如供电轨)的分段处分馈线中设置断路器, 而另一条(如回流轨)只设置隔离开关, 供处置故障和检修时操作, 检修时打开隔离开关并挂地线。

同理可给出牵引所 i 的供电线(回流线)分段示意图, 但无需设置分段器。

现以牵引网为例简要说明分段保护与状态辨识方

图8 牵引所馈线与接触带分段示意图

法^[7,10]. 牵引网的供电状态可分为正常与故障两类, 正常状态包括空载与负载, 故障状态包括短路(断线)两种, 这些状态均可通过电压互感器测量的电压和电流互感器测量的电流进行判断.

假设: 牵引所*i*本地牵引网电压(模值, 下同) $U_i \geq$ 特定值 U_{de} 时, 其左侧和右侧分段处于正常供电状态; 本地牵引网电压 $U_i <$ 特定值 U_{de} 时, 其左侧和右侧分段上的列车均不再工作, 即列车负荷为0, 该分段可能处于故障状态.

采集牵引所*i*电压互感器测量的牵引网电压 U_i , 采集牵引所*i*电流互感器测量的左侧供电轨电流 I_{i1} 和右侧供电轨电流 I_{i2} , $i=1, 2, \dots, N$. 当牵引网电压 $U_i <$ 特定值 U_{de} 时, 牵引网处于故障状态. 按照假设, 相邻分段内已无负荷, 唯有可能存在的就是短路电流. 对于图8中牵引所*i*与牵引所*j*($i+1$)之间的分段, 仍设电流 I_{i2} 流入该分段为正以及电流 I_{j1} 流出该分段为正, 并设牵引网阻抗角相同, 记纵差电流

$$I_{D12} = |I_{i2} - I_{j1}|. \quad (2)$$

显然, 若 $I_{D12} > 0$, 由此构成低电压启动的纵差电流保护动作条件, 即认为是牵引所*i*与右邻牵引所*j*之间牵引网的短路使然, 令牵引所*i*的断路器 K_{i2} 和牵引所*j*的断路器 K_{j1} 分闸, 切除故障. 同理, 记牵引所*i*左侧供电轨纵差电流为

$$I_{D11} = |I_{i1} - I_{h2}|. \quad (3)$$

当牵引所*i*本地牵引网电压 $U_i <$ 特定值 U_{de} 时, 若 $I_{D11} > 0$, 则判定牵引所*i*与左邻牵引所*h*之间的牵引网(供电轨与回流轨之间)发生短路故障, 令牵引所*i*的断路器 K_{i1} 和牵引所*h*的断路器 K_{h2} 分闸, 切除故障. 若 $\{I_{i1}, I_{h1}\}$ 或 $\{I_{i2}, I_{j1}\}$ 中只有一个为0, 则为0的一侧发生了断路故障, 非0的一侧发生了短路故障.

同时, 根据故障时的牵引网电压和电流容易计算出短路阻抗, 完成故障位置标定.

当牵引网电压 $U_i, U_j \geq$ 特定值 U_{de} 时, 牵引网处于正常状态. 仍设电流 I_{i2} 流入该分段的为正, 电流 I_{j1} 流出该分段的为正, 功率因数相同, 忽略影响很小的牵引网分布电容电流和测量误差, 则通过计算该分段两端电流大小的算数差便可进行其中列车的运行状态辨识: 若 $I_{i2} - I_{j1} = 0$, 则判定该分段内无带电列车, 因为,

当 $I_{i2} = I_{j1} = 0$ 时, 该分段处于空载, 而当 $I_{i2} = I_{j1} > 0$ 时, 该分段起传输线作用, 只通过传输功率; 若 $I_{i2} - I_{j1} > 0$, 则判定该分段内存在带电列车且处于牵引工况; 若 $I_{i2} - I_{j1} < 0$, 则判定该分段内存在带电列车且处于再生工况.

显然, 通过牵引网分段还可以更灵活地安排牵引网的运行与维修方式.

牵引网的分段保护方法同样适用于供电网分段保护; 通过供电网分段则可更灵活地安排供电网的运行与维修方式.

5 结束语

无论干线铁路取消分相, 特别是取消分区所处的分相实施双边连通供电、减少均衡电流, 以及取消车载牵引变压器以释放车内宝贵空间、减少轴重、增加功率密度、并因减少串联元件而提高牵引传动系统可靠性, 还是地铁、轻轨等城市轨道空间限制, 以及干线铁路与城市轨道交通牵引供电互联互通等诸多方面都要求牵引供电方式需兼顾大容量与较低电压直接接触供电的双重需求, 因此提出了可将干线铁路与城市轨道交通一起来的由较高电压大容量的供电网与较低压的牵引网相结合的阶梯供电方案: 即一种新型通用牵引供电系统.

通用牵引供电系统由主变电所和牵引供电网组成. 主变电所可以单独用于牵引供电, 亦可用于牵引和电力(动力照明)混合供电, 主牵引母线(单相)额定(线间)电压参考城市轨道交通中压网络可以取35 kV, 亦可参考干线铁路取27.5 kV或 2×27.5 kV. 牵引供电网包括供电网、牵引所和牵引网. 供电网推荐采用双芯电缆, 牵引网推荐采用接触带供电方案. 接触带的电压等级受较多因素制约, 初步可优先考虑5.5 kV, 并论证11 kV等级, 进行比选.

实现无分相、不间断供电这一终极目标的关键之一是相邻牵引网连通后均衡电流的大小. 分析表明, 将连接于同一电网的两相邻主变电所之间的牵引供电网经相邻的牵引网联通是最有效的, 其均衡电流可以降低至1%甚至为0, 可有效避免对电网造成不利影响.

显然, 牵引供电网的结构更加复杂, 为避免一处发生故障导致系统故障从而降低系统可靠性和可用度, 提出了分段供电和对应的低电压启动的纵差保护方

法, 分析和试验表明, 这对及时切除故障, 限制故障在最小范围进而把故障影响降低到最低程度非常有效, 分段供电还可以更灵活地安排牵引网的运行与维修方式。

干线铁路与城市轨道统一牵引供电方式可以使交通运输资源得到最佳利用, 诸如, 便于干线铁路与城市

轨道互联互通和乘客换乘, 不影响地面景观, 可以避免对电网造成不良影响而有利于电网、铁路和谐发展, 彻底消除架空接触网对轨道上部再利用的干扰等等。当然, 与之配套的许多新的课题亟待深入研究、试验。

我们期望, 经过艰苦不懈的努力, 新型通用牵引供电系统这一中国原始创新技术得以早日实现。

参考文献

- 1 曹建猷. 我国铁路电气化的途径. 人民日报, 1956.11.26
- 2 曹建猷. 电气化铁道供电系统. 北京: 中国铁道出版社, 1983
- 3 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. 141-145
- 4 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
- 5 李群湛, 连级三, 高仕斌. 高速铁路电气化工程. 成都: 西南交通大学出版社, 2006. 155-166
- 6 李群湛. 牵引变电所电气分析及综合补偿技术. 北京: 中国铁道出版社, 2006. 72-93
- 7 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 连级三. 电传动机车概论. 成都: 西南交通大学出版社, 2001. 127-151
- 9 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. 225-242
- 10 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
- 11 吴积钦. 受电弓与接触网系统. 成都: 西南交通大学出版社, 2010. 71-118
- 12 中国国家标准化管理委员会. GB/T15543-2008电能质量三相电压不平衡.
- 13 李群湛, 陈民武, 黄彦全. 高速铁路AT牵引网供电状态测控方法研究. 电气化铁道, 2014, 增刊: 11-15

Unified traction power supply mode for trunk railway and urban rail transit

LI QunZhan

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

Based on the cophase power supply system in trunk railway and industrial frequency alternating current traction power supply system in urban rail transit, a novel unified traction power supply system of trunk railway and urban rail transit is proposed to realize the connection of trunk railway and urban rail transit with continuous power supply and no phase split. The novel traction power supply system is composed of the main substations and traction power supply networks which contain power supply networks, traction substations and traction networks. Stepped power is adopted in power supply network and traction network. Connection scheme of traction power supply networks between two adjacent main substations and its effect on suppressing equalizing current are studied. A novel contact power supply and power collection scheme is also proposed in this paper, in which contact power supply is realized by what is called “contact band”, power collection is realized by what is called “electric plough”. The advantages of contact band and electric plough are discussed. The main influencing factors of the voltage level of contact band are analyzed. The implementations of main substation traction scheme, separated power supply scheme and mixed power supply scheme are discussed. Segmented protection and state identification technology are elaborated in detail. Compared with current scheme, the novel traction power supply system proposed in this paper has many advantages and deserves further study.

trunk railway, urban rail, traction power supply system, contact power supply mode, collection mode, traction and power mixed supply, segmented power supply and protection

doi: [10.1360/N092017-00184](https://doi.org/10.1360/N092017-00184)