

技术创新专稿

轨道电力牵引中高效友好的电能利用

冯江华, 张志学

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 冯江华 (1964-), 男, 博士, 高级工程师 (教授级), 长期从事牵引传动与控制的研究。

摘要: 针对轨道电力牵引的驱动系统、直流牵引供电系统及交流牵引供电系统等轨道交通能量传输和变换的几个重要环节, 介绍了最新的节能发展趋势和提升能量利用率的技术措施, 为提升整体轨道电力牵引交通领域电能利用率提供了思路。

关键词: 轨道交通; 驱动系统; 牵引供电系统; 电能利用; 直流牵引; 交流牵引; 电制动能量

中图分类号: TK019; TM922; U223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)05-0005-05

High-efficient and Friendly Energy Utilization of Rail Electric Traction

FENG Jiang-hua, ZHANG Zhi-xue

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: According to the several important segments of rail-traffic power transmission and conversion in rail electric traction driving system, DC & AC traction supply system and etc, development trend of energy saving and technic measures to improve energy usage were introduced, which provided thoughts to raise electric energy utilization ratio of the whole rail electric traction traffic field.

Key words: rail traffic; driving system; traction supply system; energy utilization; DC traction; AC traction; electric brake energy

0 引言

能源紧缺、环境恶化和能源管理效率低下, 已经成为全球面临的最大问题。中国持续高速的经济增长成为近几年全球经济的最大亮点, 但同时也引发了能源供应危机及环境保护的巨大压力。因此政府近年来高度重视节能与环保, 已将节能增效提升为国家战略重要部分。

随着经济快速发展, 中国轨道交通 (包括高速铁路、客运专线、城际铁路、干线铁路以及城市轨道交通等) 已进入快速发展时期。在国家推进资源节约型和环境友好型两型社会建设、开展智能电网工作的大背景下, 解决轨道电力牵引的供电系统中电能质量、优化能效更显重要。本文重点介绍这 2 个环节中利用电力电子技术和储能技术提升电能利用率、优化电能质量的一些新技术和新成果, 并展望了后续在节能增效方面的发展前景。

1 高效牵引驱动方案

轨道交通电力牵引系统中 (如图 1), 能量由电力系

统经交流或直流牵引供电系统传递给列车, 再由列车牵引变流系统转换成合适的电能制式提供给牵引电机, 最后经牵引电机 (直流电机、交流异步电机、交流永磁同步电机等) 将电能转换为机械能驱动列车运行。所以能量的效率取决于能量转换终端—牵引电机的效率以及能量传递系统—交流或直流牵引供电系统的效率。

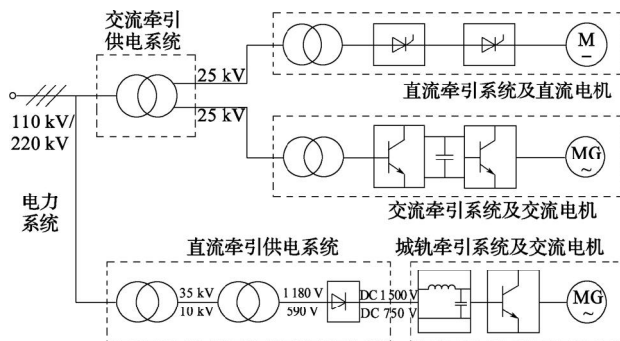


图 1 轨道电力牵引的供电系统原理示意图

驱动电机作为轨道交通系统的动力源, 担负着将电能转换为动能的能量转换器角色, 其能量转换效率对轨道交通系统的效率有至关重要的影响。目前主流的驱动电机有直线电机和旋转电机两大类, 直线电机因噪声小、爬坡特性好等特点在特殊环境条件下获得

收稿日期: 2012-08-13

应用；而旋转电机在能量利用率上占有明显优势。旋转电机又包括直流电机、鼠笼式异步电机和永磁式同步电机这三大系列，分别对应着轨道电力牵引中的直流传动、交流异步传动和交流同步传动3种模式。前两者已在我国获得了及其广泛的应用，近年来永磁同步传动系统以其更高效率的特点逐步在轨道交通特别是城市轨道交通的牵引系统中得到发展，在经历了样机试制、线路试验后，目前已逐步进入工程化和商业化应用阶段。

1.1 永磁同步牵引电机

永磁同步牵引电机采用永磁体励磁，无需额外励磁电流，在整个调速范围内保持高能量利用率和高功率因数。相比于异步牵引系统，永磁同步牵引系统效率要高3%~5%，而在低速区段效率的提升更为明显^[1]。沈阳地铁2号线第20列列车的1台永磁同步牵引电机和1台异步牵引电机的能耗对比连续测试数据表明：永磁同步牵引电机比异步牵引电机可实现平均节能9.61%^[2]。

我国轨道电力牵引路网建设规模和运营里程快速增长，城轨交通总能耗占城市电力负荷的百分比也日益增大。作为轨道电力牵引总能耗的主要部分，牵引系统能耗的下降将极大提升整个轨道交通系统的能源利用率。

1.2 直接驱动系统

传统的轨道电力牵引传动方式是电机输出转矩通过齿轮箱传递给轮对，从而驱动列车车辆。由于采用齿轮箱传动，传动过程中必然导致能量损耗，目前的能量损耗平均水平为2%。

永磁同步牵引电机功率密度高，可按多极数结构设计，整个电机尺寸减少，为轨道电力牵引采用直接驱动提供可能，从而提升了传动效率，并实现了减振降噪和减免维护。综合永磁同步牵引电机及直驱系统，与传统的异步牵引+齿轮箱传动系统相比而言，牵引传动系统的电能利用率可提升12%左右。

2 直流牵引供电系统的能量高效利用

随着我国国民经济的持续发展，城市轨道交通已成为解决大中型城市公共交通的首选交通工具，由此城轨交通直流牵引供电系统也获得了迅猛发展。在高效低碳、节能减排等理念导入这一能量传输与分配子系统后，直流牵引供电系统获得了新的发展思路。

2.1 既有直流牵引供电系统的主要缺陷

我国城轨交通直流牵引供电系统普遍采用多脉波（12脉波或24脉波）二极管整流技术。该技术简单可靠、成本低廉，但谐波污染、直流电压波动大等缺陷也逐渐暴露出来，最主要的问题还在于二极管单向特性导致多脉波整流器中功率单向流动，车辆电制动能量无法回馈，只能利用车载电阻或地面电阻将其消耗：一方面导致能源浪费；另一方面热能排放导致环境温度

上升，还衍生出需要通风、降温等附加问题，使系统总成本增加。

直流牵引供电系统利用直流侧全线贯通的方法可有效地将列车电制动产生的回馈电能转移到牵引列车上重复利用，在北京地铁、上海地铁均有通过合理调度减少电能损耗的报道。事实上行车组织对能耗会有重大影响，尤其当行车密度较高时，电制动能量很大程度上可以被牵引列车吸收。考虑到实际调度必须以安全为基本原则、行车密度不可能持续高密度等原因，电制动能量中的70%都需通过电阻进行消化。有统计资料表明：电制动能量约占整个牵引系统能量的22%，因此，针对这15.4%（电阻消化的）的电制动能量^[5]，有必要提出各种节能应对措施。

目前，直流牵引供电系统电制动能量通常采用车载电阻或地面电阻进行消耗。相比于这种能量被动消耗型的处理方式，储能型和回馈型是新型处理方式的2种基本思路，当然也可以将两者结合应用。

2.2 直流牵引供电系统电制动能量的储能应对

根据储能介质的不同，有超级电容储能、飞轮储能、蓄电池储能、超导储能等多种方案，其中前两者为主流。超级电容类似蓄电池，但寿命更长、成本更低、容量更大，适合作为储能媒介。超级电容储能方案有欧洲的低电压大容量和日本的高电压小容量2种技术流派，但控制原理基本一致。应用到直流牵引供电系统，超级电容储能系统具有能量储存和稳定直流供电网电压的双重功能，其能量流动只发生在直流牵引系统中，不涉及交流系统，故集中供电和分散供电方式都适用。其主要的缺陷在于超级电容单体容量小，要满足直流牵引供电系统的大容量需求，必须采用数量繁多的单体串并联，由此导致系统的成本上升和可靠性下降。

飞轮储能技术源自核电领域和航天领域，在英国、德国、美国等有较多的研究和应用。利用高速飞轮置于真空中的高速旋转进行能量储存，当电能输入时，通过驱动电动机使飞轮转至高速状态；当电能输出时，动能带动发电机转化为电能供直流牵引供电系统使用。这项技术的关键在于飞轮本身，需要高效率的永磁电机、磁悬浮轴承技术以及转子材料技术，目前国内尚无成熟制造工艺，只能采用进口采购和委外维护。但是飞轮储能具有充放电时间短、充放电循环次数多、能适应恶劣环境等优点，在UPS、港口提升机等领域已有成熟应用。

直流牵引供电系统电制动能量呈现短时间高峰值的尖峰特性，如单独采用储能装置予以应对，储能装置容量必须按照峰值进行设计。例如北京地铁14号线某变电所的制动峰值功率达到6 MVA，若采用超级电容储能装置，目前超级电容单体电压为2.5 V，需要串联600支单体再并联12个支路，共需7 200支单体，装置总成本超过千万元级别，且采用如此多的单体串并联，

系统可靠性必然下降。若采用飞轮储能装置, 需要48台125 kW的飞轮, 总成本甚至达到4千万左右。可见单独采用储能装置应对电制动能量回收, 最大的制约在于系统成本, 而利用节约的电能来回收成本, 其回收时间将长达10年以上。所以, 实际工程应用时还需考虑储能措施与其他技术措施联合的综合应对。

2.3 直流牵引供电系统电制动能量的回馈应对

将再生制动能量利用逆变器回馈到工业电网重新利用也是可行思路之一。根据回馈接入点的不同, 可以有高压回馈、中压回馈及低压回馈等多种可能的具体实施方案, 但这些方案中仍需保留二极管多脉波整流支路作为牵引能量流通回路, 如图2所示。回馈策略将电制动能量回馈到不同电压等级的电网中去, 在不同程度上再利用电制动能量, 无需配置储能元件, 对环境温度影响小, 现阶段具有一定优势。

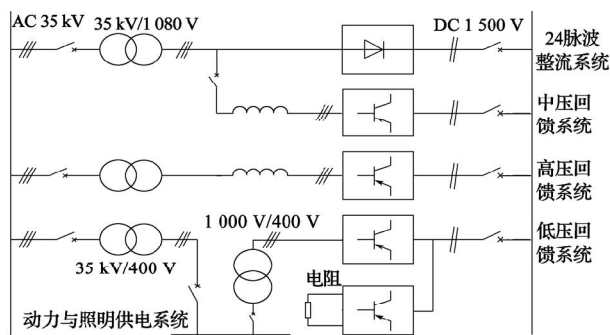


图2 直流牵引供电系统电制动能量回馈原理示意图

将低压回馈和地面电阻能量消耗装置相结合构成低压回馈系统, 系统中电制动能量由PWM整流器回馈到低压动力与照明系统, 供照明、电梯、通风系统等负载使用。该系统可在一定容量范围内充分利用电制动回馈能量, 相比地面斩波电阻方案而言能量利用率有所提高。但由于回馈能量呈尖峰特性, 而回馈能量注入点是低压动力照明系统, 其额定容量远小于回馈能量的尖峰潮流, 这将抬高低压系统电压至非正常值, 因此回馈装置控制系统必须具备动力照明系统的电压控制功能, 在电压被抬高到一定值时启动地面电阻消耗多余能量。因此本方案中地面电阻必不可少, 只是较传统地面电阻装置容量小一些而已。此外本方案必须在回馈装置与低压系统之间增加隔离变压器, 但由于额定电压仅为380 V, 变压器的体积会较大。方案的另一问题是低压系统对谐波要求严格, 须采用多重化或多电平技术, 系统成本增加。

将电制动能量回馈接入点改到整流变压器的二次侧, 就构成了中压回馈方案。中压回馈方案的重要优势在于利用了原系统的牵引变压器, 降低了系统成本和装置体积; 此外PWM整流器还可在一定功率范围之内担当牵引供电电源。方案的主要问题是二极管整流器与PWM整流器之间存在一定的环流, 回馈装置的整体效率不高; 且PWM整流器工作在过调制区, 谐波

特性不能实现最优; 或需采用非常规的PWM控制策略, 增加了控制难度。中压回馈的另一拓扑结构是在PWM整流器与既有整流变压器之间增加隔离变压器, 消除二极管整流器和PWM整流器之间的环流, 且PWM整流器工作在线性调制区, 谐波特性优于无隔离变压器方案, 但隔离变压器的增加导致系统整体体积和成本的增加。

高压回馈方案将回馈能量直接接入高压电网。由于电网容量远大于回馈能量, 能量冲击不会产生重大影响, 系统扰动小, 电阻可彻底省去。但该方案需增加高压隔离变压器和相应的继电保护装置, 系统投资有所增加。该方案在北京地铁14号线和昆明地铁2号线即将投入使用, 详细的节能数据和经济性能指标将在运行后获取。

2.4 直流牵引供电系统电制动能量的综合应对

电制动能量回馈应对策略仍以二极管整流器作为牵引能量通道, 新增PWM整流器仅作为回馈通道。但PWM整流器实际具备能量双向流动的功能, 完全可作为牵引和制动的双向能量变换器, 从而得到全PWM整流方案。该方案具有网侧电流正弦、功率因数-1~+1范围内可控、输出电压在一定范围内恒定、能量双向传输等优良性能^[3]。其主要制约在于经济性, 根据“GB/T 10411—2005 城市轨道交通直流牵引供电系统”的要求, 整流器必须具备300%额定功率输出1 min的过载能力, 但目前的IGBT等全控器件的过载能力不佳, 满足这一要求就只能将300%过载容量作为额定容量来设计, 系统设计容量严重偏大, 成本急剧上升。

全PWM整流方案的各项技术性能指标已趋于最优, 但系统成本仍显过高。考虑回馈能量的尖峰特性, 在全PWM整流方案基础上进一步提出PWM整流+超级电容(飞轮)储能综合方案, 如图3所示。利用超级电容的短时大电流充放电特性将回馈能量的尖峰削平, 其中平缓部分回馈到高压电网, 而尖峰部分则由超级电容器吸收。回馈装置容量只需考虑平缓功率, 储能装置应对的尖峰功率持续时间很短, 2个子系统容量均大幅缩小。

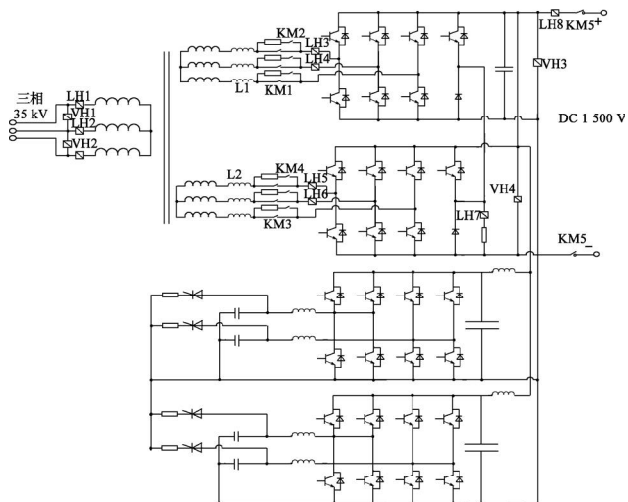


图3 PWM整流器+超级电容储能原理示意图

虽然目前超级电容或飞轮技术尚不够成熟，但一旦待其成熟，成本达到可接受水平，PWM 整流+ 储能综合方案有可能成为最佳直流牵引供电方案。

2.5 各种方案的综合评价

上述不同方案的技术成熟度和经济性能各不相同，其应用场合和推广时机也有所差异。从各个维度进行对比，如表 1 所示。由此可见，在目前技术条件下，高压回

馈方案应是大力推广的最优解决方案，事实上在广州地铁、北京地铁和昆明地铁已有高压回馈系统即将投用。当然在某些特殊情况下也可考虑低压回馈方案和中压回馈方案，至于全 PWM 方案和回馈储能综合方案，还有待电力电子技术和储能技术进一步发展，成本进一步降低。但在不远的未来，这 2 种方案可能成为主流，使得直流牵引供电系统的能量利用率达到新的高度。

表 1 各种直流牵引供电系统新方案比较表

方案类型	回馈电能利用率	主要缺陷	技术成熟度	系统成本	适用场合
低压回馈方案	部分利用	回馈容量受限	已有商业应用	稍贵	已有电阻系统的变电所
中压回馈方案	全部利用	环流	成熟	最低廉	安装场地狭小的变电所
高压回馈方案	全部利用	无	已有商业应用	一般	通常牵引变电所
全 PWM 整流方案	全部利用	过载能力受限	有示范应用	昂贵	全线新建变电所
PWM 整流+ 储能综合方案	全部利用	成本受限	尚待成熟	最昂贵	新建示范性变电所

3 交流牵引供电系统的能量友好利用

目前我国普遍采用 25 kV、50 Hz 的单相交流牵引供电系统作为干线铁路、高速列车、客运专线等铁路枢纽的动力源，如图 4 所示。我国正快速进入大功率重载交流机车、高速动车组等典型交流传动轨道电力牵引时代。由于交流传动负载具有牵引电流大、功率因数高、高次谐波突出等有别于直流传动的特点，导致交流牵引供电系统电能的利用出现一些新问题。

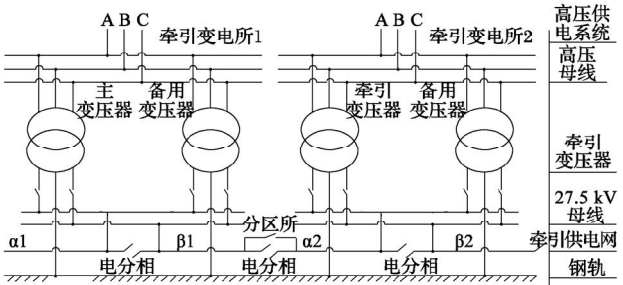


图 4 牵引供电网原理示意图

3.1 牵引供电网的无功补偿和谐波治理

无功功率的存在将影响交流牵引供电系统额定容量的发挥和系统损耗大小，而谐波分量同样影响系统容量的利用，并对变压器损耗、牵引供电网损耗产生影响。换言之，交流牵引供电系统中的无功和谐波对电能的友好传输和能量利用率产生不良作用。

众所周知，直传动电力机车功率因数偏低，牵引供电系统普遍安装固定电容 (FC) 无功补偿装置。而交流传动机车功率因数高达 0.96 以上，随着交流传动列车上线，在交、直流机车混跑线路上的牵引供电系统 FC 装置面临无法投用的尴尬。当直流机车运行时，FC 装置必须投用；而当交流机车运行时，FC 装置必须切除，否则将出现过补。因此 FC 装置的投切将变得频繁而无序，实际运用中通常切除 FC，这使直流机车运行时系统处于低功率因数状态。这种情况下供电系统必须采用 SVC 或 SVG 等装置来实现动态无功补偿。

直流电力机车采用晶闸管相控整流技术，谐波成分主要集中在 3、5、7 次等低频范围，可以通过 LC 滤波器予以治理，但更多供电区段直接不予治理。交流传动机车采用 PWM 整流技术，牵引电流低次谐波含量少，但高次谐波含量多。在某些供电区段，甚至发生牵引网电压高频谐振，影响正常运行秩序。高次谐波通过高通滤波器来治理，但它将导致某些低次谐波放大，因此须采用有源装置和无源装置、低频和高通的配合才能取得较好的治理效果。

3.2 牵引供电网的三相不平衡

交流牵引供电系统无论采用单相牵引变压器、三相牵引变压器、SCOTT 变压器、V/V 接线变压器或阻抗匹配平衡变压器，只有当牵引变压器二次侧 2 个供电臂上的牵引电流完全相等、功率因数也完全一致的前提下，牵引变压器的一次侧三相电流才会完全平衡。

牵引变压器的一次侧电流三相不平衡，使得变压器容量不能充分利用，而变压器的容量初装费又相当昂贵，导致了交流牵引供电系统成本的上升。此外随着轨道电力牵引交通模式的迅猛发展，交流牵引供电负荷占整个电力系统容量的比重正日益提升，由牵引供电系统负荷电流问题导致供电系统和铁道用电系统之间的矛盾正日益严重。

3.3 交流牵引供电系统的过分相

为了减少牵引变压器一次侧三相不平衡的影响，牵引供电系统采用分段相序轮换策略。整个交流牵引供电系统中每隔一段距离就必须设置一个无电区，即分相区间，如图 4 所示。当列车进入电分相时，须降负荷并断开主断路器，利用惯性滑行通过无电分相区间。

目前我国普通铁路仍采用手动过分相。但客运专线中列车运行速度较快，手动过分相导致操作频繁，司乘人员工作量大，且全线运行速度降低，因此采用车载自动过分相^[4]。对于重载铁路特别是高坡重载区段，无论手动或自动过分相，均会引起列车速度大幅

下降,甚至坡停,列车恢复既有速度需要一个较长的加速过程,实际上就是列车动能没有得到充分利用,或者说牵引网电能利用率在过分相区急剧下降。

3.4 交流牵引供电系统的电能质量综合治理

交流牵引供电系统中三相不平衡、无功、谐波以及过分相等问题不仅是电能质量问题,而且还严重影响了系统电能的传输效率。南车株洲电力机车研究所有限公司提出了如图5所示的牵引供电系统电能质量综合治理方案,可以有效提升交流牵引供电系统整体电能的利用率。

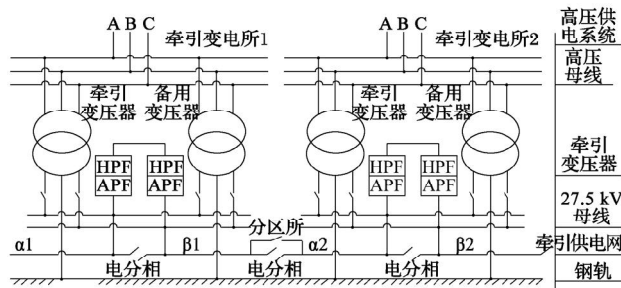


图5 牵引供电网电能质量综合治理方案

在综合治理方案当中,每个供电臂安装1台有源滤波器(APF)装置和1台高通滤波器(HPF),2台APF装置的直流侧直接并联。可从如下几个方面提升系统电能利用率:

① 高次谐波由各自桥臂的HPF装置治理,低次谐波及基波无功则由APF装置进行补偿,而且对交流牵引供电系统潜在的牵引网电压稳定性、末端电压水平也有一定的提升作用,实现交流牵引供电系统的电能友好传输和分配。

② 2个供电臂通过2台APF的直流侧可以实现有功功率的交换。任一供电臂上交流传动机车或列车由于电制动产生的回馈能量,不仅可提供给本供电臂下牵引列车再使用,还可通过APF装置转移给另一供电臂下的牵引列车再使用,大大提升系统电能利用率。

神朔铁路南梁变电所地处起伏坡道线路的顶端,变电所一个供电臂为重载上坡线路,坡度9.5‰,长度9 km;另一个供电臂为重载下坡线路,坡度为-5.4‰,长度13 km。采用双机重联HXD1C机车(功率14.4 MVA)测算,在考虑供电臂末端并联能量转移60%、2个供电臂下同时存在列车的概率为90%、功率转移通道中变流器效率99%、变压器效率98.5%等影响因素的前提下,将下坡制动能量转移到上坡供电臂使用,单趟列车可转移的电能达到190 kW·h,全年节省的电费可达532万元。

③ 2个供电臂上的有功功率互相转移,因此可确保2个供电臂的牵引电流任意时刻都大小相等,功率因数相同,从而使得牵引变压器的一次侧三相平衡,消除

负序电流。

进一步控制2台APF变流器交流侧的电压幅值和相位完全一致,可使牵引供电网2个桥臂上的电压具有相同幅值和相位,亦即同相供电,如图6所示。这时可取消变电所出口处的电分相区段,实现部分线路的完全同相运行,克服电分相带来的速度损失和电能损失,从而完美解决牵引供电系统所有电能质量问题,提升系统电能利用率。南车株洲电力机车研究所有限公司在成昆线眉山变电所成功实现同相供电运行,迄今为止系统运行2年多,变电所的全年电压不对称度均小于3%,功率因数大于0.96,效果良好。

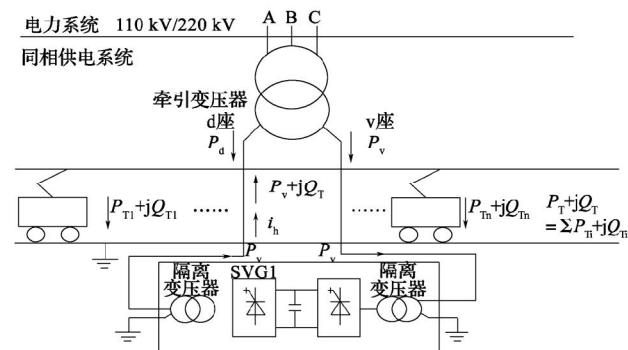


图6 基于同相供电的牵引供电网电能质量综合治理方案

4 结语

利用电力电子技术以及新型储能技术,使交流传动驱动系统、直流牵引供电系统及交流牵引供电系统等各个环节均有效地提升了电能的高效利用率,获取了节能减排的绿色成效。随着技术的进一步发展,有望在车载电力电子变压器、城市轨道交通路边储能站、交流牵引供电系统长大坡道制动储能站、储能过分相等领域进一步取得突破,提升轨道电力牵引领域电能利用水平,为国家节能减排做出更大贡献,实现能量高效利用和循环利用的双重目标。

参考文献:

- [1] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统的发展概况及应用挑战[J]. 大功率变流技术, 2012(3):1-7.
- [2] 许峻峰, 冯江华. 永磁同步传动系统的应用概况[J]. 大功率变流技术, 2010(1):38-44.
- [3] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [4] 严云升. 电力机车和电动车组自动过分相方案的发展方向[J]. 机车电传动, 2004(6):7-10.
- [5] Chuang H J. Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems by immune algorithm[J]. IEE Proceeding of Electric Power Application, 2005,152(1):61-71.

(2012轨道电力牵引技术创新论坛主题论文)