

# 电力机车网压波动故障应对措施

韩艳达

国家能源集团新朔铁路机务分公司运转车间

DOI:10.12238/jpm.v3i11.5410

**[摘要]** 随着我国高铁的快速发展,动车组运行速度和牵引功率不断提高,与此同时在实际运营过程中,与车载高压电气系统相关的安全问题也逐渐暴露出来。高速列车在过分相、短路故障处理等工况中需要频繁操作车载断路器,在断路器分合闸瞬间,牵引供电回路中存在的大量电感、电容元件之间的磁场能与电场能将会相互转换,从而产生电磁振荡以及高幅值操作过电压。与车载主断路器有直接电气联系的高压设备将会第一时间遭受过电压冲击,这会造成高压箱内设备绝缘老化或击穿,车载牵引变压器的主绝缘、纵绝缘也会受到高频过电压的威胁;此外,过电压还会感应至车体,致使车上电子通信设备接地电位不稳定,威胁列车运行安全。

**[关键词]** 高速列车;操作过电压;变压器原边;重燃过电压;抑制方法

## Response to voltage fluctuation of electric locomotive

Han Yanda

Unit: Operation workshop of Xinshuo Railway Locomotive Works Branch of National Energy Group

**[Abstract]** With the rapid development of China's high-speed railway, the running speed and traction power of the EMU are constantly improved. At the same time, in the actual operation process, the safety problems related to the vehicle high-voltage electrical system are also gradually exposed. High-speed train needs to frequently operate the vehicle circuit breaker in the circuit breaker, a large number of inductors and capacitors in the traction power supply circuit will convert with each other, resulting in electromagnetic oscillation and high-amplitude operation overvoltage. High voltage equipment with direct electrical contact with the vehicle main circuit breaker will immediately suffer overvoltage impact, which will cause insulation aging or breakdown in the high voltage box, and longitudinal insulation of the vehicle traction transformer will be threatened by high frequency overvoltage; in addition, overvoltage will sense the car body, causing unstable grounding potential of electronic communication equipment on the vehicle and threatening the safety of train operation.

**[Key words]** high-speed train; operating overvoltage; transformer original side; reignited overvoltage; suppression method

### 一、引言

操作过电压最初定义为在电力系统中由于断路器、隔离开关等设备操作所引起的过电压,现在此概念已经推广至各类变配电系统。系统中存在电感与电容等储能元件,由于断路器或其他开关设备操作,电路状态发生改变,由此可能引起储能元件 LC 振荡过渡过程,并伴随着超过正常工作电压的过电压。从能量角度解释,在过渡过程中,电感的磁场能与电容的电场能相互转换,在某一瞬间磁场能量全部转为电场能,电容电位快速上升,系统中就有可能出现数倍于系统电压的操作过电压。与电力系统有所不同,由于有受电弓、车载断路器、电分相锚段关节的存在,车网牵引系统的操作过电压产生来源更加

广泛,同时动态运行的情况下电磁环境也更加复杂。在升降弓、操作断路器、过分相等工况下,车网之间的暂态耦合会造成车体上出现高频暂态过电压,产生恶劣的电磁暂态环境,也因此引发诸多问题。由于高速铁路使用接触网进行供电,采用分相供电方式,在实际运营中,受电弓与接触网之间经常发生拉弧现象,而为了避免列车带电通过分相区烧断接触网等问题的发生,车载真空断路器(VCB)也需要进行频繁的分合闸操作。锚段关节式电分相装置相比于器件式电分相,在接触网上不存在硬点,有利于降低弓网拉弧概率,在普速和高速线路中被大量采用,但在实际运行过程中,电力机车通过接触网和中性段时,在实现有电与无电之间的过渡过程的时候,仍经常产生过

电压。作为电力机车与接触网之间的电气连接装置,受电弓在机车启停过程中都需要进行升弓或降弓的操作,为减小受电弓升弓对接触导线的冲击,受电弓上升速度设计为先快后慢,在受电弓与导线距离减小到一定程度,空气间隙会被击穿产生电弧,带来强烈的电磁振荡;受电弓在下降的过程中,为避免拉弧烧蚀接触线以及滑板,设计速度为先快后慢,快速的降弓相当于快速分闸操作,产生暂态过电压。作为受电弓与车载牵引变压器之间的电气连接装置,断路器承担了车上动力系统的机械开关与电气开关的作用,动车组采用真空断路器作为主断路器,真空的绝缘强度高,气体分子自由行程大,电弧容易熄灭,但强灭弧能力可能导致电弧电流在还没有抵达自然零点的时候就被切断,一般称该现象为截流现象,且真空断路器带的负载是感性的牵引变压器、牵引电机,截流后感性器件中储存的磁场能迅速转变为电场能,发生电磁振荡产生操作过电压。除了以上过分相、升降弓、分合闸断路器三种情况外,牵引变流器前的接触器在打开和闭合操作时也有可能产生电磁暂态,威胁变流器绝缘。

## 二、车载断路器分合闸过电压特性分析

铁路作为国家重要的基础设施,在我国综合交通运输体系中发挥着重要作用。中国的电气化铁路自20世纪50年代初开始筹划以来,经过长期的建设和发展,目前已进入高速、多元化发展阶段,总体技术水平迈入世界先进行列。截至2020年底,全国铁路营业里程达到14.63万公里,同比增长5.3%,高铁营业里程达到3.79万公里,同比增长8.3%,复线率增长到59.5%,电气化率增长到72.8%,"四纵四横"高铁网提前建成,"八纵八横"高铁网加密成型。正常运行情况下高速列车在启停车、过分相工况中需要分合闸车上主断路器,故障情况下(网侧短路、网压不正常、变流器中间直流环节短路等),也需要紧急操作断路器分闸;近年来已有研究表明,真空断路器的分合闸操作引起的高频瞬变过电压已成为变压器内外绝缘故障的主要原因,电力机车领域就曾出现过变压器套组由于高幅值过电压冲击导致烧毁的情况,因此有必要对车载断路器动作引起的操作过电压特性进行研究。正常过分相情况下,接触网一般每隔20~25km就有一段分相区,以高速列车正常运行车速估算,列车每小时要通过十多个分相区,操作断路器的次数很多,产生过电压冲击频繁。当高速列车通过分相区时,先断开断路器并减速惰行通过中性段,驶离中性段后,再闭合断路器,加速进入正常行驶状态,如图1所示。列车在整个过分相过程中,受电弓始终保持升起状态,即受电弓部分用导线等效;由于过分相前,断路器动作前牵引电机已经不再工作,故牵引变压器在过分相时处于空载状态,因此断开主断路器即为切除空载变压器,此时易产生分闸过电压;当机车滑行驶离分相区时,断路器重新合闸,合闸瞬间同样会带来强烈的合闸涌流以及过电压。

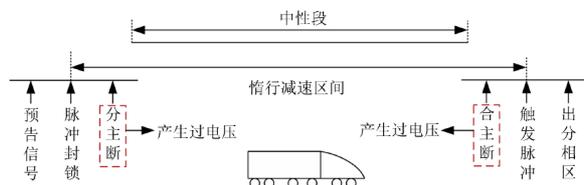


图1 过分相断路器操作过程

## 三、影响车载断路器操作过电压的关键因素

### (一) 相位对分合闸操作过电压的影响

整体来看,起始从公共电网、到中间牵引电网部分、再到终端电力机车的整个供电回路中包含了大量的电感、电容元件,它们的串、并联组合可形成具有不同谐振频率的回路。正常运行的牵引电网中是不应该存在谐波的,但是,由于某些因素的干扰,例如:故障冲击,电网拓扑结构突然改变等,可能导致短时的电磁暂态现象,过渡过程中通常会出现高频或低频的谐波振荡。在一定条件下,高频或低频谐波往往会进一步诱发生间谐波。高速列车通过受电弓引入接触网电压,网压的大小、相位对操作过电压的范围有直接影响。车载牵引变压器作为与断路器有着直接电气联系的高压设备,是最容易受到操作过电压威胁的。目前服役的高速列车主断路器受限于机械结构,暂无法实现在某个特定网压相位下精确分合。因此考虑仿真模型,在仿真中通过设置不同断路器分合闸时间来控制断路器精确的在某个特定网压相位下分合闸,以此分析相位角对变压器操作过电压的影响情况,合闸和分闸情况分别讨论,牵引变压器设置为空载。

### (二) 变压器分布电容对分闸过电压的影响

变压器原边分布电容对断路器分闸产生的操作过电压有较大影响,然而实际测试中变压器的分布电容是难以控制的一个参数,仅通过实验是无法获得分布电容与过电压的关系的。仿真模型中可以修改变压器高压侧的分布电容并保持其他参数不变,因此我们可通过仿真对列车操作过电压作敏感性分析。变压器高压侧分布电容一般通过LCR测试仪测定,其影响因素众多,与绕组绕制方式、材料、变压器容量、电压等级均有关系。根据主机厂给出的参数以及通过LCR测试仪对多种型号变压器的测量,一般25kV车上牵引主变压器的高压侧分布电容在2nF~8nF范围内,考虑到变压器前端还连接同样含分布电容的高压电缆,一般视作车上主变压器分布电容值在4nF~10nF之间。仿真条件设置为:断路器分闸,变压器二次侧短路接,模拟过电压最恶劣的情况。

### (三) 网侧阻抗对合闸过电压的影响

列车在运行过程中,牵引网的等值阻抗实际上是个变化的量,与牵引变电所和列车间的距离有关,列车处于牵引供电臂的不同位置,牵引网阻抗的大小不同。当列车运行过程中可能由于出现短路故障而迅速重合闸断路器,此时牵引网的阻抗将会影响操作过电压。前面分析了变压器分布电容对过电压的影响,接下来考虑牵引网阻抗的影响,随着牵引长度的增长,网侧阻抗增大,合闸振荡的峰值逐渐下降,振荡频率降低,暂

态时间也有所缩短。合闸过电压是呈指数衰减式的余弦振荡,并叠加在网压上,回路中电感的增大会改变合闸过电压的衰减系数,从而导致过电压波形发生变化。根据仿真结果来看,网侧阻抗的增大对合闸过电压有抑制效果,从实际行车的角度观测,如果列车在距离牵引变电所较远侧进行合闸操作,所产生的振荡会更小,而距离牵引变电所较近时合闸,则有可能较大且持续时间较长的过电压振荡。

#### 四、铁路网压波动优化建议

1) 监测机车弓网受流情况。考虑在曾经发生过网压波动的机车上安装机车网侧受流检测装置,实时收集、记录机车原边回路及高压电压互感器副边绕组电压状态值,分析受流情况,为故障原因查找提供线索。

2) 优化机车控制软件。考虑在 TCU 软件中增加网压异常情况下的实时故障记录触发功能,记录网压波动时期的实时故障波形,获取异常情况下的网压特征,然后根据波形特征进行控制软件优化,通过调整控制策略来改变机车谐波特性,避开车网谐振频率。阻容抑制器本质是一个串联的 RC 保护电路,一般并接在车载牵引变压器前端,另一端通过连接线连接至列车轴端的接地处,直接对牵引变压器进行保护。阻容抑制器中的电容一方面从改变电路参数的角度就可以降低操作过电压幅值,另一方面还可以降低断路器暂态恢复电压 TRV 的陡度,从而降低电弧重燃概率,降低变压器匝间绝缘压力,这一点是阻容抑制器优于避雷器的方面;阻容抑制器中的电阻作为阻尼元件,一方面降低振荡频率,一方面起到保护电容器的作用,避免电容过载烧毁。

3) 地面谐波治理。在优化机车软件不能达到目的的情况下,考虑加装地面谐波治理设备,消除网压中的谐振频率。除避雷器外,RC 阻容抑制器也是一类可见于电力系统、炼钢厂中的操作过电压抑制设备,其工作原理与氧化锌避雷器不同。根据第二章的分析,变压器高压侧的分布电容对操作过电压有明显的影响,RC 阻容抑制器核心原理即通过改变回路电容参数、破坏振荡条件、降低振荡频率来抑制操作过电压,与避雷器不同地方在于阻容抑制器属于频敏设备。

4) 适当降低触头合闸速度以及超行程。真空断路器由于超行程的存在,触头间合闸时存在一个压力,触头合闸碰撞可能导致电子、离子等可能引起电弧重燃的杂质残留,灭弧室内这种微粒的量直接影响断路器的重燃率。高速列车由于过分相需要频繁分合闸断路器,触头接触产生微粒的可能性远高于电力系统。由于高速列车这种特殊环境,应当适当降低断路器触头的合闸速度以及超行程,这样能够减少触头碰撞产生的微粒从而降低重燃率,但同时不能过度降低合闸速度,否则会增大预击穿概率,引起触头侵蚀加剧甚至熔焊。

5) 设置合理的分闸速度以及触头开距,同时更换性能更好的分闸缓冲器。根据第四章分析,分闸速度直接影响触头间介电强度恢复速度,分闸速度越快,触头间介电强度上升的越快,当触头间介电强度小于暂态恢复电压 TRV,将发生重燃,因此可以适当提高触头分闸速度,尤其是初始分闸速度。事实上断路器初始几毫米内的分闸速度对重燃影响是最大的,随着分闸过程的进行,介电强度已经足够高,电弧重燃已经不可能发生,而此时如果继续维持高分闸速度,将会导致强烈的分闸反弹,这样不仅会损坏波纹管等机械结构,同样也会引发触头抖动导致新一轮的电弧重燃。因此,在提高分闸速度的基础上,更换性能更好的分闸缓冲器,可以降低分闸反弹及抖动,弥补提高分闸速度带来的负面影响。

6) 改善真空灭弧室性能。灭弧室的内部洁净程度、触头的表面结构、光滑程度、构成成分、装配工艺都会直接影响断路器投切负载的性能,同时也对操作过电压的重燃现象有明显影响。比如触头材料曲率半径大,则能承受的击穿电压更高,采用特殊含银铜铬合金的触头截流值能降低至 1A 以下。提高触头的性能,可提高零件表面处理质量,采用先进材料的方式;提高真空灭弧室洁净程度,可通过采用大电流老炼、超高压老炼的方式,使灭弧室内及触头材料中的微量气体、杂质等被充分排除,降低悬浮电荷存在的概率。此外,截流相位对操作过电压的影响也是显著的,这点根据第三章的分析可以得知。当截流相位角较大,断路器分闸操作过电压倍数普遍偏高。这点可以通过研制可控截流相位角的选相分合闸断路器来实现,目前已有学者在进行此类工作。

高速列车在断电过分相、短路故障等工况中需要频繁操作车载断路器,在这个过程中由于切断或接入负载引起的电路状态切换将导致操作过电压的产生,牵引变压器、受电弓等车载 25kV 高压电气设备会立刻遭受过电压的冲击为确保高速列车行驶过程中高压电气系统及低压电子通信系统稳定运行,提高断路器、牵引变压器、变流器等高压设备寿命,有必要对高速动车组车载断路器分合闸、受电弓升降时产生的操作过电压的波形、传播、分布等综合演化特性进行系统的研究,从而降低操作过电压产生概率,抑制过电压带来的恶劣影响。

#### [参考文献]

- [1]吕顺凯. 牵引供电系统末端网压稳定技术研究[J]. 电气化铁道, 2020, 31(3):7-11.
- [2]刘晓菊, 李群湛, 康婕, 等. 同相牵引供电系统的补偿原理及再生制动特性[J]. 电网技术, 2010, 34(12):99-103.
- [3]张民, 何正友, 胡海涛. 高速动车组再生制动下网侧电流谐波特性分析[J]. 电网技术, 2012, 36(9):257-261.