

交流牵引网两边供电研究总结

李自良 陈 薇

(电气工程系)

摘 要

在电气化铁路交流牵引网两边供电条件下,对牵引网平衡电流、牵引网短路电流、迂回短路电流、继电保护方式、牵引供电系统等值计算电路和高次谐波电流的分析计算,做了简要概括。对电气化铁路的技术改造问题,给出了调查研究结果。对若干技术措施、设计规范、技术政策,提出了建议。为提高牵引供电系统的物理性能、技术经济指标以及铁路运输能力,说明了实现牵引网两边供电的可行性与重要性。

关键词:电气化铁路;交流牵引网;两边供电

牵引网两边供电时,将使牵引供电系统在电气设备、装置、结构以及运行等诸方面发生明显的变化,从而能够提高电气化铁路的技术性能和增大它的通过能力。

苏联在交流牵引网两边供电方式的研究中,做了大量的工作,其中包括理论分析和计算、试验研究、工程实践、运行分析以及新设备和新装置的研制和使用等。同时,他们的技术实践表明,此项工作具有一定的广度、深度和难度。但是,牵引网实现两边供电后,牵引供电系统的确得到了改善和加强,提高了它的多种工作性能,增大了铁路的运输能力,因而具有重大的技术和经济效益。^[1]

牵引网实行两边供电时,平衡电流的出现,自然引起铁路电气化工作者的重视。这是因为它不仅牵涉到一些技术问题,而且影响铁路运营的经济指标。牵引网的平衡电流足够大时,在技术上必须采取有效的因应措施,以便使之得到限制,从而确保电气化铁路运作如常。否则,牵引网便不能实行两边供电,而只能实行单边供电。

计算牵引网的平衡电流之前,须首先确定电力系统的穿越电流。我们定义穿越电流是在牵引网所处的多导体并联区段内,电力系统的相电流。假设电力系统的传输功率和穿越电流的正方向为自左至右,该牵引网的供电分区左、右两端相联的变电所分别为QB1和QB2,则QB1以前(之左)和QB2以后(之右)的输电线电流便是穿越电流。我们规定,穿越电流背离的方向为“前”,所指的方向为“后”。

在牵引变电所采用Y/△-11主变压器和牵引负荷最大电流的条件下,我们推导出穿越

本文于1993年2月10日收到

电流的普适计算公式,同时考虑了牵引变电所的换相联接方式。系统情况不明(如地方负荷与牵引负荷等)时,我们不妨将穿越电流取作输电线的最大容许负荷电流。实际上,这是穿越电流的最大值(上限)。它是按输电线的导线截面考虑的。这样,我们得到了穿越电流的两种计算方法。采用三相牵引变电所时,成渝线的成资段在既定计算条件下,经初步估算,牵引网的最大平衡电流将近90A。当电力系统的容量和传输功率较小时,牵引网平衡电流的数值不会过大,甚至很小于牵引负荷电流。当铁路电气化区段处于电力系统终端时,输电线中便无系统功率通过。因此,牵引网平衡电流将更小。

在牵引供电系统的各供电分区中,有时常要计及牵引网短路电流的相位。因为各供电分区的平衡电流具有不同的相位,所以它与牵引网短路电流叠加时,后者必须考虑相位。这种相位共有六种类型。当牵引网两边供电并发生短路故障时,牵引网故障电流为上述两个电流相量的代数和。不过,计算工作表明,不叠加平衡电流时,牵引网短路电流的数值和相位不会产生明显的误差。

在牵引网两边供电方式下,牵引变电所高压侧短路是具有纵向阻抗不对称特性的电力系统横向故障,属于复杂故障之列。依据短路类别,其数学模型为各自不同的复线性方程组,且均有独立的特解。在短路点,正序电流和负序电流均包括两项。第一项是单边供电时的复量,第二项是两边供电时产生的微弱增量。

根据牵引供电系统的零序网络特征,在高压侧有接地故障和牵引网流过迂回短路电流的情况下,牵引网中无零序电流,但有零序电压。此时,在牵引变电所的Y./ Δ -11主变压器中,则有零序侧尾电流。

牵引网的最大迂回短路电流可达100A以上。它对高压侧短路电流的影响甚微,因而可以忽略不计。

但是,平衡电流和迂回短路电流不仅使变电所或分区亭的馈线最大负荷电流的大小发生变化,而且使其相位也发生变化。

目前,我国电气化铁路的牵引网保护广泛采用四边形特性方向阻抗继电器。两边供电时,平衡电流和迂回短路电流都不应使牵引网保护误动作。因此,在保护的整定中应予以考虑。

由于迂回电流的存在,使主变压器在非全相状态下,承受强迫励磁状态的作用。在这种状态下,变压器磁势不平衡,将提高最轻负荷相的绕组电压。该电压可达两倍相电压的数值,可能损坏电气设备,尤其是电压互感器和避雷器。因此,在继电保护中必须考虑上述因素对设备造成的不良影响。牵引变电所高压侧短路时,无论从输电线方面,还是从牵引侧方面,均应切除短路。输电线方面由高压输电线供电侧的保护切除;牵引侧则由变压器低压侧的断路器来切除。两者在时限上应配合,即跳开变压器低压侧的断路器不应具有延时。关于保护种类,可采用零序电流或电压保护、方向电流或低电压保护等。

在两边供电的情况下,牵引网短路时,继电器的测量阻抗中,过渡电阻比实际值大。当分区亭后面短路时,测量的过渡电阻可能增大一倍。这样,测量阻抗可能落在继电器的动作范围外,从而导致继电器不动作。为此,我们建议采用L型阻抗特性。它是由纵向和横向平行四边形叠加以后形成的。坐标原点在平行四边形内,这样可以消除死区。

交流牵引网的两边供电方式具有许多优点。但是,相邻变电所的牵引母线电压之间,存在相量差时,在牵引网中便产生平衡电流。在物理实质上,平衡电流主要是电力系统负荷经

牵引网的分流。

对于电气化铁路的运作而言,平衡电流几乎完全是一个负面因素。牵引网平衡电流的分析计算工作具有重要意义。我们采用的主要计算条件是:变压器空载电流为零;变压器的各相短路阻抗相等;各牵引变电所变压器的变比相等;只计基波分量。

牵引网平衡电流是变压器的空载电压及其阻抗、纵向输电线阻抗、牵引网阻抗、电力系统负荷电流以及牵引负荷电流的矢量函数。其中,平衡电流特别与相邻牵引变电所外特性(包括变压器的空载电压及其阻抗)的差异有关。

我们参考并采纳了三种计算方法。搭氏(Тамазов)法与保氏(Бородулин)法一脉相承。平衡电流包含三个分量,它们分别与输电线电压降、变电所固有电压降以及供电臂邻扰电压降有关。马氏(К. Марквардт)法不计固有分量和邻扰分量,只认为平衡电流是电力系统稳定负荷经牵引网的分流。它是塔氏和保氏平衡电流的第一项分量,但却是主要分量,即传导分量。因此,塔氏法所考虑的因素比较全面,但马氏法的计算比较简捷。

牵引网平衡电流对三相变压器各相绕组电流分布具有不同的影响。该电流使工作相的负荷减小,同时使最轻负荷相的负荷增大,而且滞后相比引前相的负荷减小得更多。

电气化铁路的设计工作中,牵引供电系统的电气计算方法通常依赖于设计条件。这时,由于缺乏变电所母线电压的准确数据,只能取近似值,甚至所取的电压数值与牵引负荷无关。即使进行必要的电气计算,事先亦必须向电力系统索取资料,如系统阻抗等。但是,电力系统处于发展和变化之中。初步设计时获取的系统技术数据,到电气化区段开通时便可能发生了变动。此外,向电力系统索取资料,还要履行手续,发送公文等。

电气化铁路实际开通和牵引供电系统投入运行后,对其物理实质和数学表征,时常缺乏了解。近期运量下,如何洞察和掌握供电系统的现有状态和通过能力;远期运量下,如何发掘现有供电系统的潜力,并预测该系统到那时的工作状态。如果现有系统的极限通过能力(与牵引供电设备的技术规格、线路状况、信集闭等多种因素有关)不能满足运量增大的需要,又应如何加强乃至改造该系统,亦即如何进行扩大既有电气化铁路运输能力的技术改造。实质上,以上这些问题的解决,都离不开牵引供电系统的等值计算电路。换言之,等值电路是牵引供电系统的物理映象,它是认识和改造供电系统的有力工具。对于实际运行的铁路电气化区段,铁路部门正确拟定供电系统的等值电路及其有关参数后,可以不再依赖电力系统的有关部门,还可以不再受原来的设计文件和资料的约束,而只将其作为运行的参考,以资比较和对照。任何设计工作必然带有一定程度的假拟性和误差,这是设计规范所容许的。运行实践才是供电装置的真实工作状态。根据等值电路进行牵引供电系统的分析和计算以及研制技术方案时,必要时应采用电子计算机辅助分析和程序设计手段。

在工作相牵引母线与钢轨之间,将牵引变电所主变压器以及电力系统视为有源二端网络,它由空载电压源和输入阻抗组成。输入阻抗包括电力系统和牵引变电所主变压器的阻抗,它的有名值应归算至牵引侧。

按照换相联接方式,将牵引变电所联接至高压输电线路。这时,用电流源考虑相邻区段负荷的影响。以相邻区段牵引负荷电流的相位为基准时,该恒流便滞后或引前其 60° ,这就明显地影响到牵引网的电流分布和电压状态。

通过实际测量,获得牵引变电所的外特性,用以表征等值电源的性质。由外特性曲线,可

求得变电所的空载电压和内阻抗。输入阻抗等于内阻抗的 $2/3$ 倍。

采用单相等值电路时, 可将牵引变电所作为独立电源。这样, 可将牵引供电系统从广义缩小到狭义。

跟电力系统有关部门提供的系统阻抗相比较, 铁路电气化工作者自己获得的牵引变电所外特性阻抗更为准确与切合实际。

牵引供电系统的三相和单相等值电路的构成原理相同, 它们都考虑了牵引变电所的空载电压及其输入阻抗、电力系统的影响以及相邻供电臂的影响。显然, 单相等值电路与三相等值电路相比, 其基本概念突出, 理论的提升程度较高, 所以结构精练, 使用也简便。

戴维南定理中, 有源二端网络的开路电压是常量; 实际中, 牵引变电所的空载电压是变量。因此, 等值电路及其电气计算具有近似性。但是, 牵引供电系统(狭义)类似于中压和低压配电网, 牵引变电所又有电压调节装置, 故其空载电压的实际变动较小(包括幅值和相位)。该计算方法所产生的误差是完全容许的(在苏联, 电力网的计算容许误差为 $\pm 10\%$, 而牵引网为 $\pm 15\%$)。

牵引供电系统的电气计算方法, 在铁路电气化的设计和运行条件下, 应予以区分。设计时, 间接地确定必要的原始数据。在运行条件下, 实际数据直接由牵引变电所电压和电流的测量结果而取得。这就可能比较准确地进行计算工作, 从而确定铁路电气化区段在正常和事故状态下的通过能力。

以等值电路为媒介, 可对牵引供电系统进行模拟分析计算。数学模拟时, 建立复线性方程组, 采用电子计算机进行分析计算。物理模拟时, 采用静态模型, 如模拟试验台等。

现行设计中, 按照国家标准, 各三相牵引变电所的主变压器均采用 $Y/\Delta-11$ (减极性) 联接组, 且牵引侧的 c 相端子一律接地。此时, 无论电力系统对牵引变电所进行单边或两边供电, 采用三种类型的标准换相联接方式—— ABC, ACB, CAB ——已经足够。^① 这将给变电所的设计和施工带来方便, 我们建议将其正式列入设计规范。

近年来, 对于电气化铁路高次谐波问题的研究比较多。我们的分析工作主要侧重于高次谐波电流在牵引供电系统中的主要物理行为。如牵引负荷的三次谐波电流在主变压器绕组和高压输电线路中的分布规律以及对主变压器负荷的影响等。

当馈线电流和机车电流以电力系统电压的实际极性进行定向时, 同一供电分区和相别不同的其他供电分区内, 各整流式电力机车的三次谐波电流近于同相, 它们以代数和的方式进行合成。

当两条馈电线均有负荷时, 三次谐波对三相变压器负荷绕组电流有效系数的影响甚微。故此, 馈线负荷近于相等时, 变压器容量计算工作可按牵引电流的基波进行之, 也就是可以不计高次谐波电流的影响。至于最轻负荷相绕组的电流波形畸变, 可被该绕组较大的容量储备所补偿。

正确的牵引变电所换相联接方式及其完整的循环能够真正减小电力系统电源的负荷电流之三次谐波含量。但必须考虑牵引变电所一次电流中的三次谐波。这就是说, 牵引变电所群的换相联接方式构成合理的组合时, 能够补偿电力系统中的三次谐波电流。理论上的理想情

① 关于三相牵引变电所换相联接方式的符号表示法, 见李自良, 陈薇, 《牵引变电所》, 324, 附表 13。

况是：在变压器的所有绕组和输电线的导线中，三次谐波电流只在介于变电所之间的输电线区段内环流，而不流出该区段之外，亦即不流入电力系统。

如上所述，我们研究牵引供电系统的等值计算电路和高次谐波问题，并不离题。这是因为，牵引网两边供电研究中，需要借助等值电路进行分析，同时也要考虑谐波问题。

电气化铁路投入运行后，随着运量的逐年增大，特别是开行重载列车时，增大的运量和既有的运能之间便形成尖锐的矛盾。因此，牵引供电系统往往需要改善和加强，从而进行技术改造（即所谓扩能改造）。如果原设计存在欠缺，则技术改造的迫切性将更为突出。技术改造的投资数额巨大，有时不啻修建一条新的电气化铁路。^[2]

加强牵引供电系统的诸多措施中，实现牵引网两边供电便是一种切实可行的方法。宝成线罗妙真分区亭的投入运行已经证明了这一点。同时，该分区亭只是作为一个特例（处于系统终端）投入运行的。

从罗妙真分区亭的运行经验看，当牵引网两边供电时，更应采用自动远动技术。这样，哪怕分区亭的地址被迫选择在丛山峻岭之巅和高山峡谷之内以及其他偏僻地段时，都便于解决运行和维护方面的问题。

在牵引供电系统的电气性能中，牵引网电压水平是最为直观和关键的技术指标。牵引网电压低于限值时，电气化铁路便不能正常运行。为了增补牵引网电压水平，除传统的串联电容补偿外，我们提出了增压变压器方案。这是从本课题派生的一个分支，属于新产品开发与研制的范畴。对此，我们已和生产厂家，另行进行研究，此地不详述。

三十多年来，在我国并非不存在牵引网两边供电的设想。不仅如此，该设想还反映在教科书、技术文献乃至一些技术措施中。但是，两边供电却一直未能实现。我国实现牵引网两边供电方式的具体困难反而不在于技术问题本身，而是在于电力工业和铁路运输管理体制方面的许多问题与矛盾。譬如电力和铁路部门间、相关电力部门间、相邻铁路部门间的多重行政关系需要化解与调和。涉及的具体职能部门有电力工业部、铁道部、国家计委、电力工业局及供电局、铁路局和铁路分局及供电段等。此外，许多人都认为，在相当多的情况下，牵引变电所采用三相三绕组变压器具有重大优势，但除丰台西牵引变电所等例外，这个设想亦因电力工业管理体制等原因，而未能实现。

在苏联，与铁路并行架设的纵向输电线路向牵引变电所供电时，这些输电线通常还向地区负荷供电，同时用于电力系统各部分间的功率交换。由高压大容量的统一动力系统（ЕЭС）向电气化铁路长大干线输送能量的这种供电方式，目前我国很少采用，因而也增加了实现牵引网两边供电的一定难度。但是，随着我国电力工业的发展，跨越省区的大型联合电网亦将得到进一步发展，所以电气化铁路的供电状况必将有所改观，并会有利于实现牵引网两边供电。

总而言之，牵引网两边供电不仅具有重要的技术和经济意义，而且在我国是可行的，我们拟对之进行更深入的研究。两边供电的牵引网应该是牵引供电系统的一个有机组成部分，而不应是权宜之计。牵引网两边供电是扩大铁路运输能力和加强供电可靠性的有效方法。如果采用牵引网两边供电方式，则可以提高牵引网电压，减小牵引网能耗，保证足够的牵引变电所间距，因而可以减少旧线改造和新线建设的投资。中国的交流牵引网迄今一律采用单边供电方式。显然，这是不正常的，也是不合理的，且使我国与国际水平之间，形成明显的差距。

我国的牵引网两边供电势在必行。为此, 应将两边供电正式和具体地纳入国家的技术政策之中。

参 考 文 献

- [1] 李自良. 牵引网两边供电综述. 纪念电气化铁路三十周年论文集. 陕西铁道学会, 1991
- [2] 李自良. 电气化铁路的技术改造. 电气化铁道, 1992; (3)

A Summary Report on Study of Two—Side Supply for the AC Tracting Network

Li ziliang Chen Wei

ABSTRACT

This paper is a summary report on scientific researches. On condition that the two—side supply of the ac tracting network for the electrified railway, brief generalizations have been done to analysis and calculation of the circulating current of the tracting network, short—circuit current of the tracting network, circuitous short—circuit current, relay protection scheme, equivalent calculating circuit of the tracting supply system, higher harmonic current. We have given results to investigate for technical remouldings of electrified railway. We also have advanced suggestions to a number of technical measures, design norms, technical policy. Possibility and importance to realize the two—side supply of the tracting network have been explained, in order that we might heighten physical property of the tracting supply system, technical economics targets, ability of the railway transportation.

Key words: electrified railway; ac tracting network; two—side supply