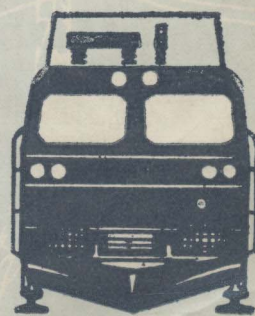


电气化铁道 供电网及其干扰影响

继续工程教育培训教材

中国电机工程学会城市供电专业委员会
系统干扰及保护分专业委员会
武汉市科协武汉供电局分会
北京市供用电专业委员会
四川省铁道电气化专业委员会
成都市电机工程学



绪 言

随着电信、电子、电力及电气化铁道系统的科学技术的发展,城市电力网中电气化铁道供电网对邻近电信,弱电流设备以及对电力系统的电磁干扰,日益引起人们的关注,我们聘请多学科跨行业的专家学者编辑“电气化铁道供电网及其干扰影响”一书,它可做为:

- 从事电力、电信、铁道、城建等部门工程师的继续工程教育的教材。
- 从事电气化铁道工作的工程师如何处理电磁干扰问题的参考书。
- 为大专院校教学研究的辅导材料。
- 为学生们提供了解电磁干扰现象的参考书。

本书分为五大篇及附录,约36万字。各篇各为一专题,自成体系,理论连系实际,穿插例题,可独立使用。

各篇分别由西南交通大学简克良、贺威俊,成都科技大学张一中、尹可华,北方交通大学蒋忠涌,西南电管局设计院徐宇顺等编写。由编辑委员会负责本书编审出版工作,其成员为:李芬辰(主编)、邱脉悌(付主编)、简克良、贺威俊、张一中、尹可华、蒋忠涌、徐宇顺。编辑薛念抗、刘传才。

本书1987年底完成初稿,1988年上半年分别在北京、上海、成都、武汉地区邀请专家初审,并于1988年6月在成都审稿会上审定,由撰写作者根据审定意见进行修改,最后由编委会编辑完成。参加审稿会的专家有:蔡家鲤、周宗鲁、沈智渊、罗祖鉴、朱保哲、刘世铨、屠三益、全祥、唐德光、秦楠士、邱脉悌、李芬辰、朱典丰、周达身、刘传才、张道泉、江日洪、容健纲、薛念抗等。

感谢四川省电机工程学会、北京市供用电专业委员会、四川省铁道电气化学会、成都市电机工程学会,及武汉市科协武汉供电局分会对本书出版的支持及赞助。

本书如有遗漏及不当之处,请来函指正。

电气化铁道供电网及其干扰影响

目 录

绪 言

第一篇 电气化铁道概论	西南交通大学简克良 (1)
第一章 单相工频交流电气化铁道的构成及其优越性.....	(1)
第二章 牵引供电方式的分类及其演变, 牵引变电所的电气结线.....	(4)
第一节 牵引变电所一次侧供电方式.....	(4)
第二节 牵引侧供电结线方式.....	(6)
第三节 牵引变电所主变压器结线方式.....	(9)
第四节 牵引变电所电气主结线图.....	(12)
第三章 列车电流和列车损耗.....	(14)
第一节 电力机车及其牵引特性.....	(14)
第二节 列车电流曲线和列车能耗.....	(15)
第四章 牵引变电所容量计算.....	(17)
第一节 正常运行时的容量计算.....	(17)
第二节 紧密运行时的容量计算.....	(20)
第五章 牵引变压器容量选择.....	(21)
第一节 变压器的负荷能力.....	(21)
第二节 容量选择条件.....	(23)
第六章 牵引网阻抗.....	(25)
第一节 直供式和 BT 式牵引网阻抗.....	(25)
第二节 自耦变压器结线方式牵引网阻抗.....	(27)
第七章 结语.....	(36)
第二篇 电气化铁道供电系统运行、控制与保护	西南交通大学贺威俊 (37)
第一章 供电系统运行管理基本问题与特点.....	(37)
第一节 电力牵引负荷曲线特性与电器负载能力.....	(37)
第二节 不平衡电力牵引负荷的电能计量.....	(41)
第三节 供电系统的调度、控制与运行管理特点.....	(44)
第二章 牵引供电系统无功补偿.....	(47)
第一节 无功补偿综述.....	(47)
第二节 并联补偿的构成方法.....	(48)

第三节	无功、负序综合补偿	(53)
第四节	并联补偿的经济性能	(57)
第五节	几点结论	(59)
第三章	供电系统短路故障分析	(62)
第一节	电牵引供电系统短路故障特点和故障形式	(62)
第二节	对称分量法在牵引网故障分析中的应用	(63)
第三节	三相—两相系统线性变换的原理与应用	(65)
第四节	A T 供电方式牵引网与 B T 复线牵引网短路电流计算	(71)
第四章	供电系统继电保护与故障测距装置	(77)
第一节	电牵引供电系统保护与故障测距特点	(77)
第二节	牵引网距离保护应用的阻抗继电器	(79)
第三节	牵引网典型保护方式及其整定计算方法	(86)
第四节	电力牵引网计算机继电保护装置	(97)
第五节	牵引网故障测距装置	(102)
第五章	电气化铁道远动监控系统	(107)
第一节	电气化铁道远动监控系统的特点, 制式与性能指标	(108)
第二节	布线逻辑式远动装置原理	(110)
第三节	微计算机远动监控系统简介	(114)
第三篇	电气化铁道的负序电流和电力谐波	西南电管局设计院 徐宇顺 (119) 成都科技大学 张一中
	(张一中审订)	
第一章	电气化铁道的负序电流	(119)
第一节	电气化铁道供电系统不对称运行状态	(119)
第二节	对称分量法	(122)
第三节	牵引负荷产生负序电流的计算方法	(124)
第四节	负序电流在电力系统中的分布	(130)
第五节	负序电流的影响	(139)
第六节	降低负荷电流的措施	(140)
第二章	电气化铁道的电力谐波	(144)
第一节	傅里叶分析	(144)
第二节	快速傅里叶变换 (F F T)	(150)
第三节	电力谐波的产生	(156)
第四节	电力机车的正流特性	(165)
第五节	单台电力机车电流的谐波分析	(169)
第六节	牵引变电站谐波电流的分析	(174)
第七节	电气化铁道谐波的叠加计算方法	(183)
第八节	谐波分布计算	(186)
第九节	电力谐波的危害	(191)
第三章	电力谐波的监测与治理	(196)

(202) 第一节	电力谐波的控制指标和标准	(196)
(202) 第二节	电力谐波的监视与测量	(199)
(202) 第三节	用相数倍增法降低谐波	(203)
(202) 第四节	用交流滤波器滤除谐波	(204)
(218) 第五节	用波形补偿原理来降低谐波	(211)
(218) 第六节	用曲折绕组消除电力谐波	(215)

第四篇 电气化铁道对通信设备的无线电干扰影响.....北方交通大学 蒋志涌 张林昌 (222)

第一章 电气化铁道的干扰源参数.....(224)

第一节 线路阻抗与纵向衰减.....(227)

第二节 横向衰减(距离特性).....(229)

第三节 频率特性.....(230)

第二章 电气化铁道无线电干扰的测量.....(232)

第一节 干扰频谱的测量.....(232)

第二节 横向传播衰减的测量.....(235)

第三章 电气化铁道无线电干扰测量数据的统计特性.....(235)

第一节 干扰频谱特性.....(235)

第二节 距离特性.....(240)

第四章 对无线通信设备干扰影响的评价.....(243)

第一节 实际评价时应注意的问题.....(243)

第二节 对机场导航台的实测影响.....(245)

第三节 对短波、超短波、无线通信的实测影响.....(251)

第四节 对电视接收的实测影响.....(256)

第五节 对广播收音台的实测影响.....(260)

第五章 电气化铁道无线电干扰的研究方向.....(263)

第一节 微型计算机与测量仪表的结合.....(263)

第二节 电磁噪声统计参量的研究.....(264)

第三节 干扰源的抑制.....(269)

第四节 对通信影响的研究.....(270)

第六章 地下铁道的无线电干扰.....(271)

第一节 地下铁道电磁辐射源概况.....(271)

第二节 北京地下铁道电磁环境现状的测试结果与分析.....(272)

第五篇 电气化铁道供电线对地下金属管道的影响及其防护.....成都科技大学 尹可华(278)

第一章 交流腐蚀及其他不利影响.....(279)

第一节 长输管道及其阴极保护系统.....(279)

第二节 长输管道的交流腐蚀.....(282)

第三节 干扰影响下的牺牲阳极和阴极保护.....(299)

第四节 人身及设备安全.....(302)

第五节 不利影响的分类	(303)
第二章 干扰影响的分析和计算	(305)
第一节 静电场影响	(305)
第二节 地电场及其分布	(307)
第三节 地电场对管道影响的特点和转移电位	(315)
第四节 磁场影响的物理模型及分析方法	(319)
第五节 管道电气参数及其测定	(333)
第六节 管道磁干扰电压的计算	(340)
第七节 磁干扰分析理论的探讨	(348)
第三章 防护措施和电磁兼容	(355)
第一节 安全间距	(355)
第二节 静电场和地电场干扰的防护	(357)
第三节 排流法降压	(358)
第四节 电抗器分段隔离	(364)
第五节 其他防护措施	(365)
第六节 管道和强电线间的电磁兼容	(367)

附录：李芬辰摘编

- 附录 1 中华人民共和国铁道部标准 T B J 9—85
“铁路电力牵引供电设计规范” 摘录第一章总则
第二章牵引供电 第三章牵引变电所
- 附录 2 中华人民共和国国家标准 G B 4824.1~4824.2—84 工业、科学和医疗射频设备无线电干扰特性的测量方法及允许值
- 附录 3 中华人民共和国国家标准 G B—6364—86 航空无线电导航台电磁环境要求及编制说明
中华人民共和国国家标准 G B 7495—87 架空电力线路与调幅广播收音台的防护间距
- 附录 4 联邦德国 1982 年 5 月~10.7 技术建议书
关于在三相高压电力系统和单相铁道牵引系统附近的管道设备和运行标准(摘录)

第一篇 电气化铁道概论

简克良

西南交通大学

第一章 单相工频交流电气化铁道的构成及其优越性

一八二五年,英国建成世界上第一条有轨铁路以来,距今已有160年的历史了。这中间,铁路本身发生了巨大的变化。蒸汽机的发明,使铁路牵引首先以蒸汽为牵引动力。蒸汽机的完善,使铁路蒸汽机车的技术也日趋完善,因而造就了蒸汽机车在铁路上为人类服务160年的历史。但是这种自给性机车的致命弱点是机车的热效率最高也只能达到6~7%,因而注定了蒸汽机车最后被淘汰的命运。

电力牵引的雏形是1879年在柏林展览会上出现的。这条最早的电气化铁路是一条三百m长的椭圆形线路,轨距1米,直流电压150V,由第三轨向机车上的牵引电动机供电。此后1881年在法国出现了第一条有轨电车线路,采用架空供电方式,使供电电压得以提高,从而增大了牵引电动机的功率。

牵引电流制式是因电动机的技术发展状态而形成的。作为最早型式的直流电动机,尤其直流串激磁电动机具有极为优越的软调节特性,直至目前,仍然是牵引电动机的主要型式。因此,世界上最先发展起来的电力牵引是以直流制出现的。一方面直流牵引电动机的端电压因换相片工作限制不能无限提高,目前最高端电压以1.5KV为佳,一方面因电力机车控制手段及牵引特性的限制,使目前直流制电气化铁道牵引网的电压水平最高以3.3KV为限,虽然个别考虑6.6KV电压等级,但未见推广。以4千KW的电力机车计,其满载机车电流将达1.3千安的可观数值。为保持牵引网上的电压水平,可以采取的措施是供电区两边供电,增加导线截面(其最大导线截面可达500平方毫米等值铜截面的可观数值),减小供电区长度(其最小长度竟达20余公里)。从以上情形可见,直流制电气化铁道,如不更改变流措施,其技术发展已达到极限程度。

铁路运输事业的发展,要求机车具有足够大的牵引功率,在足够的可靠性条件下,具有最简化的供电设备和最大的经济效益。以我国第一条电气化铁路宝成线为例,宝一凤区段的限制坡道以30%计,两台蒸汽机车仅牵引700吨货物,且运行速制只达30km/h。改成电气牵引以后,以上岭牵引2400t计,用三台韶山型电力机车牵引,其运行速度可达40~50km/h。电气化前后的输送能力为从262万吨/年跃升为1324万吨/年。

这样大的输送能力并不是通过铁路实行直流制电气化来实现的,它是通过目前世界上最

先进的单相交流工业频率电气化铁道来实现的。目前世界上运行速度最快的铁路列车，其运行速度可高达200~230km/h，功率最大的铁路机车可达单台8000kw，它们都是在工频交流电气化铁道上实现的。

单相工频交流电气化铁道的构成系统可用下图表示：

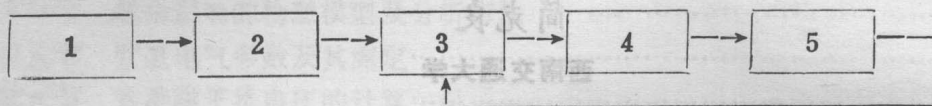


图 1—1 电牵引供电系统构成图

其中1是电力系统的中心变电站，从1引出专用的输电线向铁路牵引变电所送电，2就是专用高压输电线。为保证供电可靠性，向铁路牵引变电所供电的高压输电线必须是双回路的，或者是双电源系统的闭式电网。3是沿铁路线布置的牵引变电所。牵引变电所接受从电力系统送来的三相高压电力，实行降压和减相，然后把适合于电力牵引用的电能由馈电线馈送给环节4，即电气化铁路的牵引网。所谓降压，是把电力系统一般是110千伏或220KV系统的电压，通过牵引变压器降低至27.5KV，所谓减相，是指把电力系统的三相电力，减为两相或单相电力，馈送给牵引变电所两侧相邻馈电臂的馈电区段，其结构示意图如下图所示：

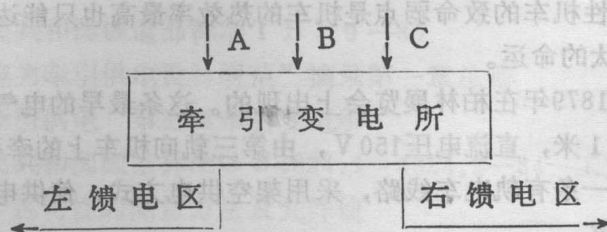


图 1—2 牵引变电所减相馈电示意图

减相是通过牵引变电所中的主变压器，通称为牵引变压器实现的。牵引变压器可以采用普通的Y/Δ联接的三相变压器，也可以采用特种结线的变压器，例如原次边都联成开口三角形的主变压器，或斯柯特结线变压器或变形伍德桥形结线变压器等都可以实现减相的要求。电气化铁路的牵引网主要由悬挂在铁路线路上的接触网和作为回流通路的铁轨构成。顾名思义，牵引网是牵引电流流通的通路。环节5是在电气化铁路上完成牵引任务的电力机车。由于仍然采用直流牵引电动机传动，所以在电力机车上必须安设整流设备及平波设备。整流变压器将牵引网上的27.5KV交流电压降至1.5KV后，其二次侧以中抽式结线联于硅整流机组，通过和牵引电动机串接在一起的平波电抗器构成整流回路。在牵引回路工作过程中，由于整流回路的换相重叠现象以及平波电抗器的平波作用，使整流变压器一次侧电流波形成关于横轴对称的非正弦电流波。按傅里叶分析，可以解算成基波电流和含有奇次谐波电流的总和，其中以三次谐波含量较高，约为基波分量的18~20%。这些谐波电流将按一定的分配关系流动于牵引网和电力系统中。

电气化铁路的牵引电流制从直流制变为工频交流制以后，可以显示出如下的一些优点：

由于牵引网电压从3.3KV升高至27.5KV，因此牵引变电所之间的距离可以从原来的

20km延长至40~60km左右甚至可以延长至80km左右。

由于牵引网电压水平的提高,电气化铁路的有色金属用量大量下降,从而有效地降低了电气化铁路的造价。

由于牵引变电所中不必设置整流设备,使得牵引变电所的结线大为简化,所用电气设备 & 占地面积都大为降低。

由于电力机车上可以通过变压器调节电压,牵引电动机在启动和运行中都采用并联联接,这使得电力机车的粘着系数及牵引性能得以提高,具有较直流电力机车更为优越的牵引特性。

当然,工频单相交流制牵引也产生一些不利的因素,例如:

单相交流制的供电方式会使三相电力系统产生不对称运行方式,当流入电力系统的负序电流过大时,会造成发电机过热以及电动机转矩下降等不利情形。

电力机车的功率因数较低,一般为0.82,当系统过多地向铁路供电系统输送无功功率时,会使系统的运行指标下降,产生无谓的经济损失。为此,一般都需要在牵引供电系统中加设无功补偿装置,当然这就增加了电气化铁路的建造投资。

电力机车在整流过程中产生的谐波电流,将会在电力系统中流动,谐波电流过大,不但会造成额外的功率损失,而且也会影响系统内交流电动机的运行特性。谐波电流还会对就近的弱电线路产生明显的电磁干扰。

尽管这样,单相工频交流电气化铁道仍以其巨大的优越性在电气化铁道的发展领域中,逐步取代直流制以及其它交流制电气化铁道的历史地位。前述的各项问题正以新的、有力的技术措施加以解决,例如:

随着电力半导体及晶闸管技术的发展,和微电子技术的突飞猛进,使得人们有可能通过对变流电路的改革,造成电力机车变成为不产生谐波电流以及不需要无功功率的负荷。

随着新型供电结线方式的采用,可以使电牵引供电系统对沿线弱电线路的电磁干扰降至最小程度。

随着电子计算机技术的发展,使得有可能实现电气化铁道供电系统用微计算机在线监控,从而使其达到优化运行状态等等。

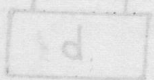


图 1-1 单相交流制牵引供电系统示意图

一、单相交流制牵引供电系统的特点
单相交流制牵引供电系统的特点是:牵引变电所采用单相变压器,牵引网采用单相接触网,电力机车采用单相变压器。这种供电方式的特点是:牵引变电所的结线简单,占地面积小,有色金属用量少,造价低。但是,这种供电方式也存在一些问题:牵引网电压水平低,牵引电动机启动和运行中采用并联联接,使得电力机车的粘着系数及牵引性能得以提高,具有较直流电力机车更为优越的牵引特性。当然,工频单相交流制牵引也产生一些不利的因素,例如:单相交流制的供电方式会使三相电力系统产生不对称运行方式,当流入电力系统的负序电流过大时,会造成发电机过热以及电动机转矩下降等不利情形。电力机车的功率因数较低,一般为0.82,当系统过多地向铁路供电系统输送无功功率时,会使系统的运行指标下降,产生无谓的经济损失。为此,一般都需要在牵引供电系统中加设无功补偿装置,当然这就增加了电气化铁路的建造投资。电力机车在整流过程中产生的谐波电流,将会在电力系统中流动,谐波电流过大,不但会造成额外的功率损失,而且也会影响系统内交流电动机的运行特性。谐波电流还会对就近的弱电线路产生明显的电磁干扰。尽管这样,单相工频交流电气化铁道仍以其巨大的优越性在电气化铁道的发展领域中,逐步取代直流制以及其它交流制电气化铁道的历史地位。前述的各项问题正以新的、有力的技术措施加以解决,例如:随着电力半导体及晶闸管技术的发展,和微电子技术的突飞猛进,使得人们有可能通过对变流电路的改革,造成电力机车变成为不产生谐波电流以及不需要无功功率的负荷。随着新型供电结线方式的采用,可以使电牵引供电系统对沿线弱电线路的电磁干扰降至最小程度。随着电子计算机技术的发展,使得有可能实现电气化铁道供电系统用微计算机在线监控,从而使其达到优化运行状态等等。

第二章 牵引供电方式的分类及其演变

牵引变电所的电气结线

第一节 牵引变电所一次侧供电方式

牵引变电所的一次侧直接联于三相电力系统。为保证牵引变电所能可靠地取得电源，或者采取双回路供电，或者采用多电源的闭式供电方式。

环状供电方式如图 1—3 所示。

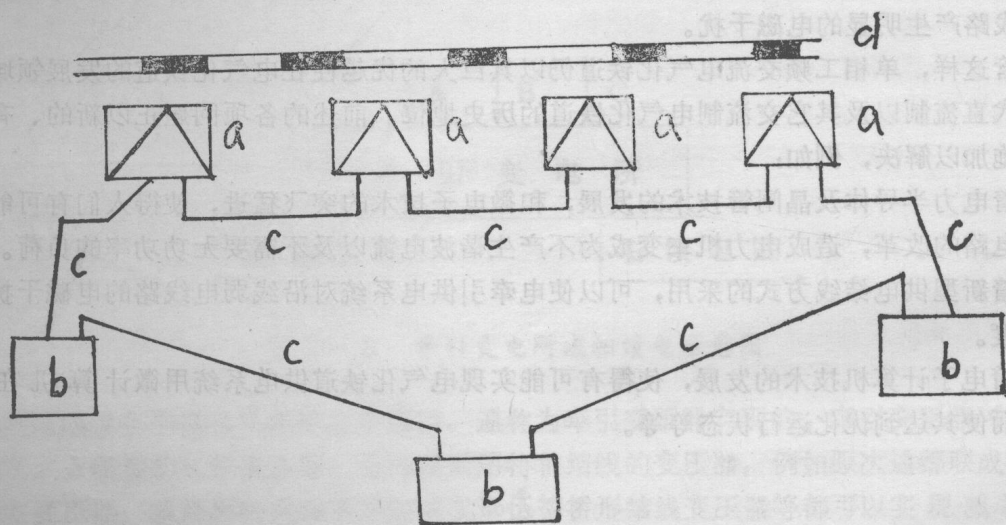


图 1—3 牵引变电所环状供电结线图

其中，a 是沿铁路线 d 布置的牵引变电所，对于工频交流制电气化铁道其间距约为 50~80km。b 是电力系统中的中心变电所，c 是将中心变电所和牵引变电所联成闭环网络的高压输电线。这种供电方式可以保证足够的供电可靠性，但往往受系统供电式制的限制而不易实现，而且所要求的开关电器数量也较多。

牵引变电所采取两边供电的方式也是保证供电可靠性的有力措施，其结线如图 1—4 所示：

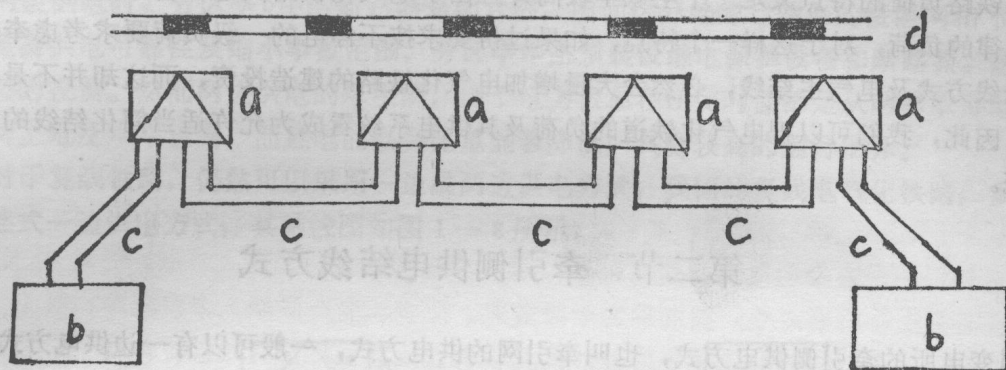


图 1—4 牵引变电所两边供电结线图

其中，每个牵引变电所a间都用两路输电线相联，当然这样供电可靠性是很高的，当系统中有一个中心变电所停电时，仍可保证全部牵引变电所的供电。然而对于每个牵引变电所都要设四路进线，无疑将使牵引变电所的结线过于复杂，而且所用电气设备过多。在能够保证供电可靠性的前提下（例如中心变电站的运行可靠性极高），也可以采用各牵引变电所用一回输电线相联的结线方式。

当铁路所处地区只能由一侧供电时，可以采用两回输电线单侧供电方式，每回输电线的容量应能满足全部用电要求，因而两回线中可使一回处于备用运行方式。有时为了提高供电电压水平，也可以双回同时工作，这种单侧开式供电方式的结线图如图 1—5 所示：

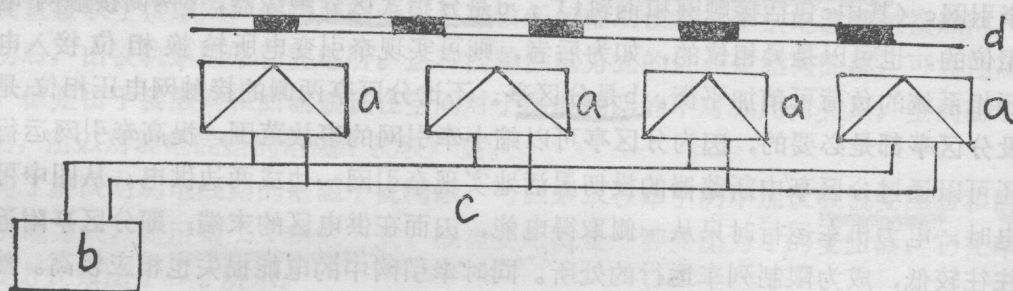


图 1—5 牵引变电所一边供电结线图

其中牵引变电所a称为中间变电所，而牵引变电所a'则称为终端变电所。由于每个中间变电所都是从高压输电线上分支引入的，所以称为分接线方式或称为双T进线方式。这种方式的最大优点在于牵引变电所的主结线非常简单，可以节省进线断路器。当牵引变电所中设有两台主变压器时，可以在高压侧通过中间设有隔离开关的横向跨条线实现并联工作。但是，当连接的分支变电所数目过多时，会降低供电的可靠性，而且牵引变电所的操作要和系统密切配合，所需时间较长。为了克服这一缺点，也可以考虑每隔 2~3 个分接线式中间变电所加设一个中心牵引变电所，高压输电线引入中心牵引变电所，并在此实行分段保护。

电气化铁路的牵引负荷属于 1 级负荷，这是由铁路运输在国民经济中所占的地位决定了

的。但是铁路负荷的特点又是一个空载率较高并且由于电气化铁路供电设备维修需要，有一定停电规律的负荷，对于这样一个特点，如果过份要求按不停电的一级负荷要求考虑牵引变电所的进线方式及电气主结线，必然会大量增加电气化铁路的建造投资，而这却并不是非常必要的。因此，我们可以把电气化铁道的负荷及其供电系统看成为允许适当简化结线的一级负荷系统。

第二节 牵引侧供电结线方式

牵引变电所的牵引侧供电方式，也叫牵引网的供电方式，一般可以有一边供电方式和两边供电方式两种。一边供电方式结线图如图 1—6 所示：

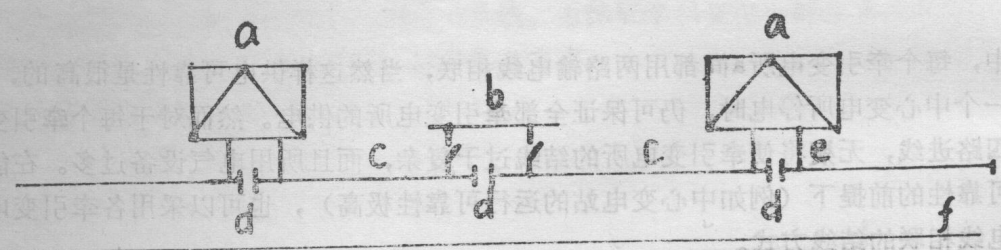


图 1—6 牵引网一边供电方式结线图

其中a是牵引变电所。牵引变压器将三相电能降压、减相以后，通过馈电线已 将牵引电流送至牵引网c（其中c包括接触网和钢轨f）；d是分相式区分绝缘器，d两侧接触网电压可以是同相位的，也可以是异相位的，如为后者，则可实现牵引变电所轮换相位接入电力系统，使三相系统的负荷可稍加平衡。b是分区亭。不论分区亭两侧的接触网电压相位 是否相同，安设分区亭都是必要的，因为分区亭可以缩小牵引网的事故范围，提高牵引网运行的可靠性。还可以通过分区亭中断路器的投切灵活地实现牵引网一边或两边供电。从图中可见，一边供电时，电力机车运行时只从一侧取得电能，因而在供电区的末端，即分区亭附近，电压水平往往较低，成为限制列车运行的处所。同时牵引网中的电能损失也相应较高。然而这种供电方式对继电保护系统的要求较为简单，因而成为常用的一种牵引网供电方式。

两边供电方式结线图如图 1—7 所示：

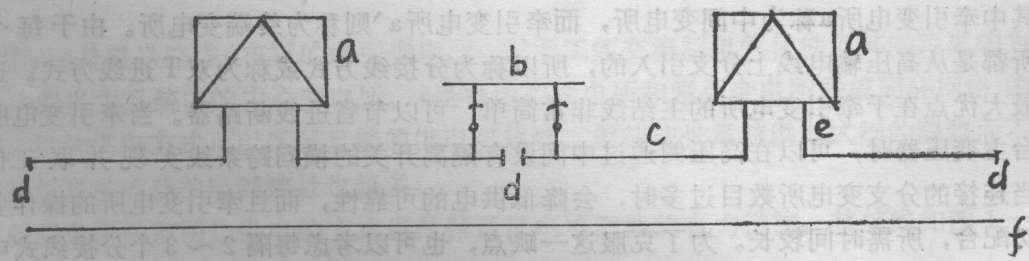


图 1—7 牵引网两边供电方式结线图

两边供电时，分区亭b中的断路器是闭合的，因而区分绝缘器两侧的接触网相位相同。为了提高供电可靠性及缩小事故范围，分区亭中必须装设继电保护设备和断路器。这就增大了设备的投资。然而两边供电的牵引网，由于电力机车在任何时候都是从两侧取得电能，所以其网上电压水平较高，而且电能损失比重显著降低，具有较高的运行指标。

对于复线铁路，仍然可以采用一边或两边供电方式，我国的复线电气化铁路，多采用末端串连式一边供电方式，其结线图如图1—8所示：

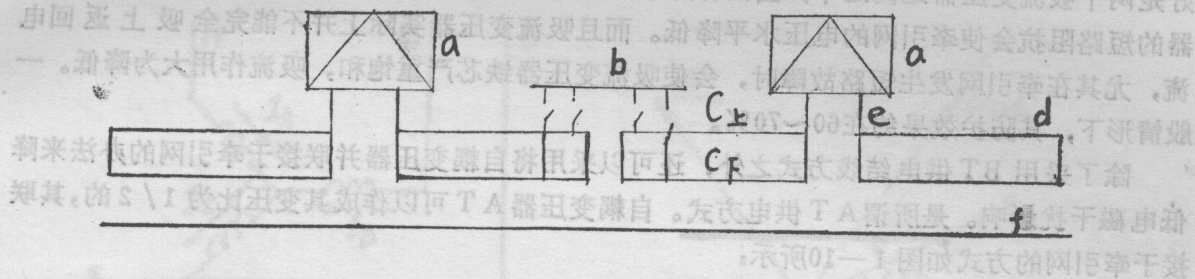


图1—8 复线电气化铁路末端串连式一边供电方式

其中牵引变电所的两相馈电线分别联于两侧的上行及下行接触网 $C_{上}$ 和 $C_{下}$ ，从图中可见，在同一段的上下行接触网具有相同的电相位。这时分区亭的开关可以是都打开的。

在牵引网实行一边及两边供电的总前提下，随着供电技术的进步，电气化铁道的牵引网结线方式及供电方式也有许多种类，最简单的是直供方式，也称R—T方式。即将变电所的馈电线直接联于接触网，在接触网上不再加设任何辅助设备，牵引电流通过接触网，电力机车做功后，由铁轨返回牵引变电所。这种简单供电方式的优点是结构简单，可靠性高，维护方便。但是由于接触网和回流铁轨在空间对于弱电线路的不对称几何关系，空间磁场不能有效对消，所以对弱电线路的电磁干扰较严重。

为了解决对弱电线路的电磁干扰问题，可以采取在牵引网中加设吸流变压器和回流吸上线的供电方式，是所谓BT供电方式。吸流变压器是一种变比为1的变压器，它在牵引网中的联接方式如图1—9所示：

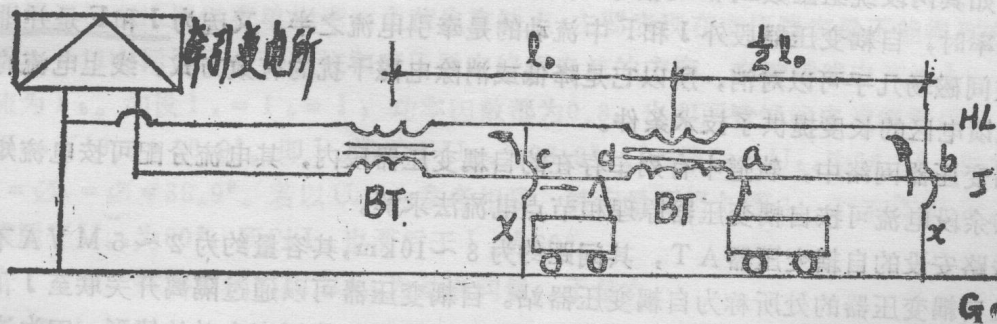


图1—9 吸流变压器接入牵引网的方式

其中 J 是接触网，G 为轨道，HL 为回流线，X 为吸上线，BT 为吸流变压器。由于吸流变压器之变流比为 1，并且其一次侧串接入接触网 J，二次侧串接入回流线 X，而回流线是和接触网并行架设的。当牵引电流通过接触网，亦即通过 BT 的一次绕组时，必然使二次绕组强迫把轨中电流通过吸上线流通于其中，这样就极有效地降低了空间干扰电磁场，降低了对通信线路的干扰。但是，这种吸流变压器联接方式存在着防护不全的半段效应。例如，当电力机车处于 d 点时（参见图 1—9），cd 段回流线中没有回流电流；电力机车处于 a 点时，ad 段接触网中没有牵引电流，这两种情形都是不能产生防护作用的现象，而其长度恰好是两个吸流变压器距离之半，因而称为半段效应。把吸流变压器联入牵引网中，吸流变压器的短路阻抗会使牵引网的电压水平降低。而且吸流变压器实际上并不能完全吸上返回电流，尤其在牵引网发生短路故障时，会使吸流变压器铁芯严重饱和，吸流作用大为降低。一般情形下，其防护效果约在 60~70%。

除了采用 BT 供电结线方式之外，还可以采用将自耦变压器并联接于牵引网的办法来降低电磁干扰影响。是所谓 AT 供电方式。自耦变压器 AT 可以作成其变压比为 $1/2$ 的，其联接于牵引网的方式如图 1—10 所示：

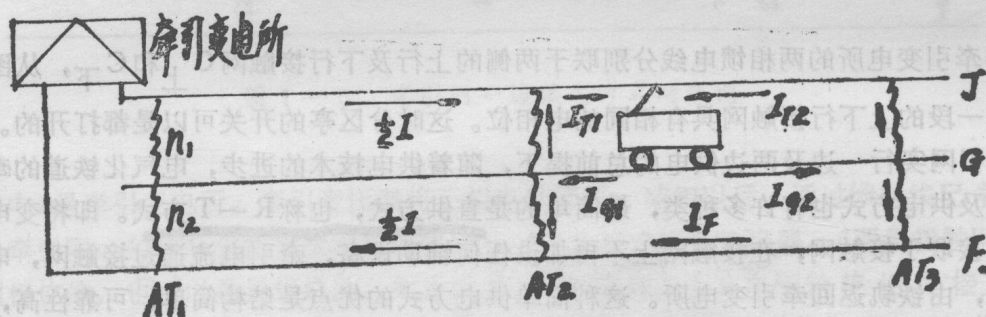


图 1—10 AT 供电方式结线图

图中 $AT_1 \sim AT_n$ 等是并联接于牵引网上的各自耦变压器，J 是接触网，F 是供电线，G 是轨道。电力机车仍然运行于 JG 之间，其受电弓上电压仍然是 25KV。因此，作为自耦变压器，如其两段绕组匝数 n_1 和 n_2 相等时，其高压原边电压应为 50KV。可见在完成相同的牵引功率时，自耦变压器段外 J 和 F 中流动的是牵引电流之半。又因为 J 和 F 是并排架设的，其空间磁场几乎可以对消，所以它是降低或消除电磁干扰的有效方式。线上电流的减少也为延长馈电区的长度提供了技术条件。

自耦变压器网络中，轨道中有列车存在的自耦变压器段内，其电流分配可按电流矩法求解，而其余段电流可按自耦变压器原理和节点电流法求解。

沿铁路安设的自耦变压器 AT，其间距约为 8~10km，其容量约为 2~5MVA 不等。每个安设自耦变压器的处所称为自耦变压器站。自耦变压器可以通过隔离开关联至 J 和 F，也可以通过真空开关联于 J 和 F，这往往是自耦变压器站和分区亭合并的情形，因为这时可以集中在分区亭中安设控制电源。

第三节 牵引变电所主变压器结线方式

牵引变电所主变压器多采用Y/Δ—11绕组联接的三相变压器，或者三相—两相90°变换的斯柯特（或伍德桥形）的变压器。三相变压器高压侧额定线电压为110KV，牵引侧电压为27.5KV，比牵引网额定电压高10%。可以两台变压器并列运行，其绕组联线如图1—11所示。

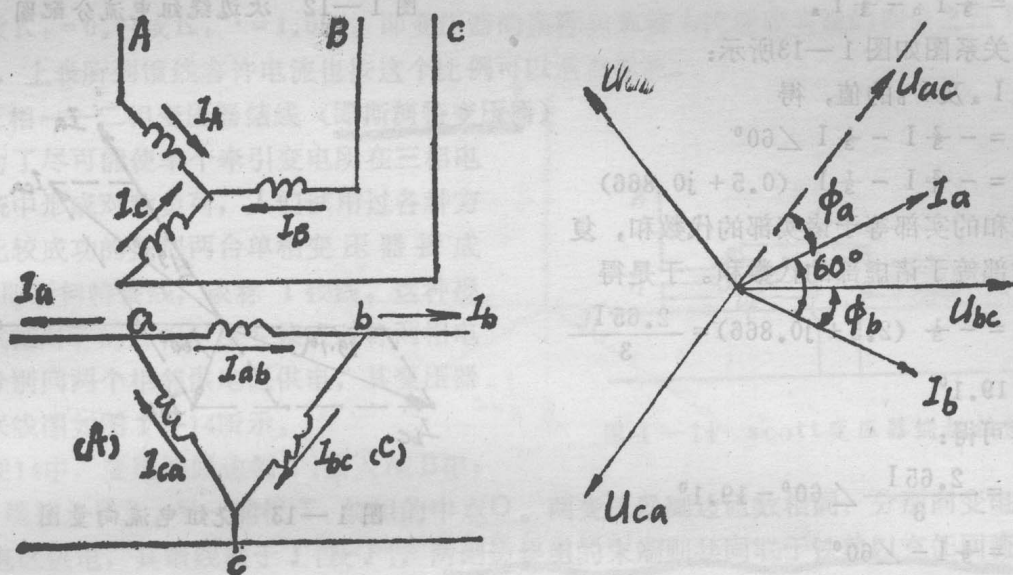


图 1—11 三相变压器联线及电流电压相量图

如图1—11，变压器次边C端接轨道地回路，由ac相供应左边供电区的牵引网，bc相供应右边分区的牵引网。绕组ca与高压侧A相绕组同相，bc与c绕组同相。A相滞后于c相。所以ca相是滞后相，标记为(A)供电分区。bc相是超前相，标记为(C)相供电分区。

三相变压器的优点是牵引侧保持三相，因而有利于供应牵引变电所三相自用电和地区三相电力。另外，两台变压器并列，当一台变压器停电时，供电不致中断。

采用三相变压器供应单相牵引负荷也有缺点，主要表现在变压器容量不能得到充分利用。

图1—11中标记了负荷电流和变压器中绕组电流的方向。左臂馈线电流为 I_a ，右臂馈线电流为 I_b 。如设 $I_a = I_b = I$ ，功率因数都为0.8，也即两臂馈线电流都滞后于各自的馈线电压 $\cos^{-1}0.8 = 36.9^\circ$ 。即 I_a 滞后于 U_{ac} 为 36.9° ， I_b 滞后于 U_{bc} 为 36.9° ，即功率因数角 $\phi_a = \phi_b = \phi = 36.9^\circ$ 。若以 U_{bc} 为参考相量，其向量图将如图1—11右图所示。如图， U_{bc} 滞后于 U_{ac} 为 60° ，所以 I_b 也滞后于 I_a 为 60° 。

为了方便，计算中我们改用 I_b 为基准向量，于是有：

$$I_b = I$$

$$I_a = I \angle 60^\circ$$

当只有 I_b 流通时, 绕组cb中的电流将为 $\frac{2}{3}I_b$, 绕组ca中电流将为 $\frac{1}{3}I_b$ 。当只有 I_a 流通时, 绕组ca中电流将为 $\frac{2}{3}I_a$, 绕组cb中电流将为 $\frac{1}{3}I_a$ 。 I_a 与 I_b 同时流通时, 绕组中电流可表示于图12中。

于是我们有:

$$I_{bc} = -\frac{2}{3}I_b - \frac{1}{3}I_a$$

$$I_{ca} = \frac{1}{3}I_b + \frac{2}{3}I_a$$

$$I_{ab} = \frac{1}{3}I_b - \frac{1}{3}I_a$$

向量关系图如图1—13所示:

代入 I_a 及 I_b 的值, 得

$$\begin{aligned} I_{bc} &= -\frac{2}{3}I - \frac{1}{3}I \angle 60^\circ \\ &= -\frac{2}{3}I - \frac{1}{3}I (0.5 + j0.866) \end{aligned}$$

复数和的实部等于诸实部的代数和, 复数和的虚部等于诸虚部的代数和。于是得

$$\begin{aligned} I_{bc} &= -\frac{1}{3}(2.5 + j0.866) = \frac{2.65I}{3} \\ &\angle 180^\circ + 19.1^\circ \end{aligned}$$

同样可得:

$$I_{ca} = \frac{2.65I}{3} \angle 60^\circ - 19.1^\circ$$

$$I_{ab} = \frac{1}{3}I - \angle 60^\circ$$

由以上结果可知, 绕组bc与ac电流大小相等, 绕组ab电流 I_{ab} 则只有 I_b 或 I_a 的值的 $\frac{1}{2.65}$ 或0.378倍。

三相变压器角侧的额定电流(线电流)等于绕组额定电流的 $\sqrt{3}$ 倍。按以上计算, 当 $I_a = I_b = I$ 时, I 等于绕组bc或ca的电流的 $\frac{3}{2.65} = 1.13$ 倍。所以当 I 等于变压器额定电流的 $\frac{1.13}{\sqrt{3}}$ 或0.655时, 绕组bc和ca的电流即达到其额定值。而这时的输出容量

$$S = 2U_e I = 2U_e \times 0.655I$$

则变压器的容量利用率

$$K = \frac{2U_e \times 0.655I}{\sqrt{3}U_e I} = 0.756$$

即: 当三相变压器担任单相负荷供电任务时, 其输出容量只能达到其额定容量的0.756或 $\frac{3}{4}$ 。

按以上计算, 当两侧馈线电流达到变压器额定电流的0.655时, 绕组电流即达到其额定值。由此可得三相牵引变压器馈线电流长期容许值如下表所示。

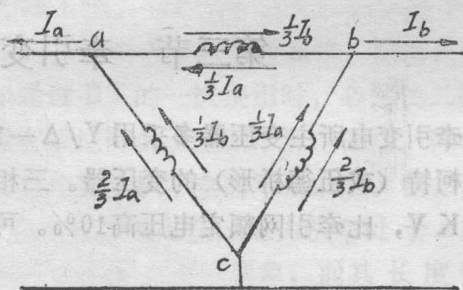


图1—12 次边绕组电流分配图

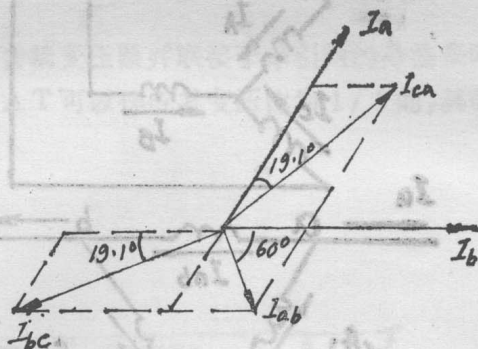


图1—13 绕组电流向量图

牵引变电所容量 (KVA)	额定电流 (A)	馈线容许电流 (A)
三相 2×10000	420	275
三相 2×15000	630	412
三相 2×20000	840	550

实际中, 由于bc、ca两相绕组达到满载时, ab组只达到 $\frac{1}{2.65}$ 或 $0.378I$, 高压侧三相绕组相应也是这样, 所以变压器还没有达到额定温升, 即还有一定裕度。通常我们引入温度系数 $K_t = 0.94$ 或 $K_t^{-1} = 1.065$ 。即变压器的实际负载能力比额定容量的四分之三可提高6.5%, 上表所列馈线容许电流也按这个比例可以适当提高。

三相——二相变压器接线 (即斯柯特变压器)

为了尽可能使单个牵引变电所在三相电力系统中形成对称负荷, 人们试用过各种方法。比较成功的是把两台单相变压器接成scott即斯柯特接线, 或称T接线。这种接线方式把对称的三相电压变换成对称两相电压, 分别向两个相邻供电区供电, 其变压器绕组联线图如图1—14所示。

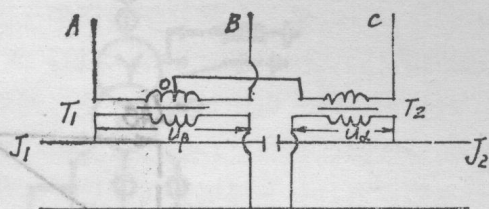


图1—14 scott变压器绕组接线图

图14中, 变压器原边侧 T_1 接入A B相;
 T_2 一端接入C相, 另一端接 T_1 绕组的中点O。两变压器副边匝数相同, 分别向变电所的两侧供电区供电, 其馈线联于 J_1 及 J_2 , 两副边绕组的末端则共同联于铁轨以充任回流线。以 T_1 看成等边三角形的底边, 则 T_2 成为此等边三角形的高, 如 T_1 的标么匝数为1, 则 T_2 原边的标么匝数为 $\sqrt{3}/2$ 。如取两副边的标么匝数也为1, 则副边电压值相等并且其相位相差 90° , T_2 变压器副边电压引前于 T_1 变压器副边电压 90° 。形成三相——二相变换系统。其电压向量图如图1—15所示

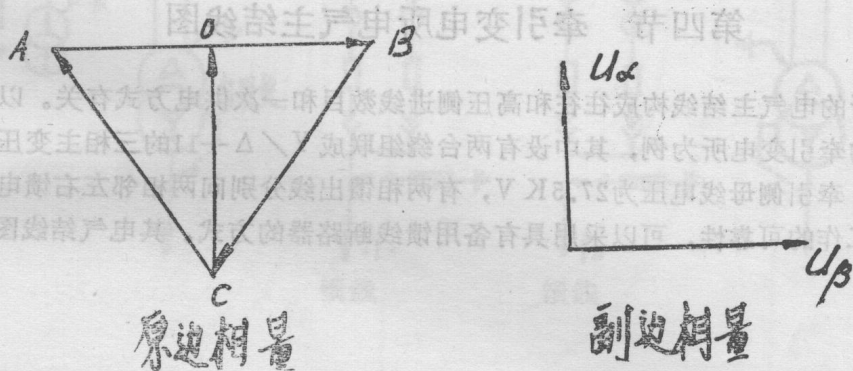


图1—15 scott变压器原副边电压向量图

其中, U_α 是高变压器 T_2 的副边电压向量, 而 U_β 则为底变压器 T_1 的副边电压向量。