

高速电气化铁路中的弓网电弧现象研究综述

高宗宝, 吴广宁, 吕玮, 何常红, 周利军

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 高速电气化铁路弓网系统中的电弧已经成为制约我国高速铁路发展的技术瓶颈。笔者论述了电弧对接触导线、受电弓滑板、通讯信号、无线电信号和供电质量等的危害, 从电弧产生的机理和特征、电弧模型、电弧能量、电弧侵蚀和载流摩擦磨损方面综述了相关电弧问题的研究现状, 为深入开展弓网电弧现象、机理及抑制措施的研究打下了基础。

关键词: 电气化铁路; 弓网系统; 电弧产生机理

中图分类号: TM501.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)03-0104-05

Research Review of Arc Phenomenon between Pantograph and Catenary in High-speed Electrified Railway

GAO Zong-bao, WU Guang-ning, LU Wei, HE Chang-hong, ZHOU Li-jun

(Institute of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The arc phenomenon between pantograph and catenary is a technical bottleneck in the development of high-speed electrified railway in China. The harm of arc to contact wire, pantograph, communication signal, radio signal and power supply quality is analyzed in this paper. The current researches on mechanism and characteristics of the arc, the arc model, arc energy, arc erosion, and frictional wear due to electrical current are discussed to supply a foundation for further researches of arc phenomenon between pantograph and catenary, arcing mechanism, and arc inhibition methods.

Key words: electrified railway; pantograph and catenary system; arcing mechanism

0 引言

工程实践表明, 弓网关系是目前制约我国高速铁路发展的瓶颈之一, 而弓网电弧是弓网关系中需要解决的核心问题^[1]。

弓网电弧是指由于接触导线的不平顺、接触网的振动、受电弓弓头的振动、轨道的不平顺等多种因素的影响, 受电弓与接触导线在相对高速滑动中分离而产生的气体放电现象。电力机车(高速动车)速度越高, 受电弓与接触导线分离的可能性越大, 弓网电弧越容易产生。我国于2006年7月4日在胶济线上的弓网受流试验显示, 当列车运行速度达到200 km/h时, 弓网电弧现象已经非常严重。洛阳供电段洛阳东变电所和荥阳变电所的运行数据显示, 机车在过分相时由于拉电弧而跳闸事故2006年为32起, 2007年为34起, 监控录像显示在过分相瞬间, 弓网接触处会出现大火球, 情况非常严重。我国将于“十一五”计划期间建设高速客运专线达9 800 km, 其中

速度超过300 km/h的线路就有5 457 km, 在这样大规模的高速电气化铁路的建设中, 弓网电弧已经成为阻碍高速铁路顺利发展的直接原因, 而随着电力机车(高速动车)运行速度的不断提高, 弓网电弧的危害也将愈来愈严重。因而研究电气化铁路中的弓网电弧问题, 对促进我国高速铁路的建设和发展具有重要的意义。

1 弓网电弧的危害

弓网电弧是受电弓和接触导线滑动接触切向方向相对高速运动、法向方向相对缓慢运动且移动距离小条件下的自由空气放电现象。与开关设备中电弧相比, 其两电极运动速度快(高速电气化铁路中弓网相对速度达350 km/h)、所处环境恶劣、影响因素多, 而且没有专门的灭弧设备和抑制方法, 因而其危害与开关设备中电弧相比, 其特征完全不一样。

1.1 对接触导线和受电弓滑板的侵蚀和磨损

弓网电弧对接触导线和受电弓滑板的侵蚀表现为加速氧化、熔融、蒸发、喷溅等, 每种形式的侵蚀都

收稿日期: 2008-05-23; 修回日期: 2008-12-23

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0718); 西南交大青年教师科研启动项目(2007Q020);

教育部博士点新教师基金(200806131015)。

作者简介: 高宗宝(1982), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统故障诊断与在线监测及电气化铁道相关的研究工作。

会对接触导线和受电弓滑板有着不同程度的损坏。

电弧产生的磨损造成接触线和受电弓滑板的凹凸不平,加剧接触表面电流不规则地分布,在接触表面发生过热点和小的熔接现象。如果机车在高速下行驶,熔接点瞬间脱落,使接触线和受电弓滑板损坏情况更加严重^[2]。

侵蚀和磨损轻则影响弓网稳定受流,损坏接触导线和受电弓滑板,增加维修工作量;重则导致接触线断裂,造成机车运行事故。

1.2 产生过电压

当弓网电弧产生时,牵引网和电力机车(高速动车)的电气传动系统通过电弧连接在一起,在接触网和受电弓之间的电弧上有压降,当电弧消失后,如果电力机车(高速动车)还处于离线状态,则导致电路中的电流发生突变,产生过电压。过电压在接触网上传播,会给整个牵引网的绝缘带来威胁;过电压沿着受电弓进入机车内部,可能对机车电气设备、电力电子器件造成损坏,对电力机车(高速动车)的安全运行产生严重的影响^[3]。

1.3 产生高频噪声

电弧产生时向周围发射高频噪声,对机车沿线的通讯信号和无线电信号造成很大的干扰,严重时会导致通讯中断和无线电信号失效等现象。另外,高频噪声还对机车的控制信号有影响,是机车安全运行的隐患。

1.4 电力机车(高速动车)供电质量下降

弓网电弧导致电流/电压的突变和不平稳,严重影响机车的受流质量,机车受流不稳定将导致机车电气传动系统中的整流恶化,影响整流设备的可靠工作。

2 电弧研究现状

高速铁路弓网电弧是一个复杂的研究对象,与电磁场、热场、气流场、等离子体等运动变化相关。由于弓网电弧产生的环境复杂,涉及能量大小的影响因素、产生和熄灭机理、时空分布规律、能量传输特性等多个环节,无论采用理论分析还是实验模拟都十分困难。到目前为止,还很少见到对弓网电弧问题专门研究报道,与之相关的电弧问题的研究主要集中在开关电弧模型的建立和分析、能量分布、对触头材料的侵蚀和载流摩擦磨损等方面。

2.1 电弧模型

电弧模型的研究起步较早,20世纪30年代的Cassie和40年代的Mayr提出两个著名的电弧数学模型^[4,5],这两个模型均以能量守恒方程为基础。20世纪70年代建立了开关电弧的一维模型^[6-10],假设电弧温度均匀或沿径向按一定规律变化,通过数值计算,得到各状态变量在轴向上随时间变化的情

况。20世纪80年代电弧模型由一维模型发展到二维模型^[11-13],但是这些二维模型对断路器的灭弧室结构都做了简化,对散热方式只是考虑了对流和辐射的影响。20世纪90年代电弧模型的研究重点转向实际断路器灭弧室的数值模拟^[14,15],开始考虑电磁力、湍流、气体粘滞等断路器灭弧室实际因素的影响。在电弧模型研究的发展过程中,研究人员主要是通过研究断路器灭弧室内气流场来了解电弧的性质,文[16,17]将电弧描述为一个导电棒,电弧半径由柯西能量平衡公式确定。在确定电弧运动速度时,文[17]借助于激波理论计算获得,文[16]则根据经验数据拟合得到。而Horinouchi从电弧的实际形态出发,将电弧假定为由若干电弧片段连接而成的链条,电弧片段的个体运动决定了电弧链的整体运动。

我国在开关电弧模型方面也取得了很大进展。文[18]研究小组提出了使用等效电阻网格法建立电弧的模型,使用“电流管”的概念来描述电弧中的电荷运动;文[19]采用磁流体理论建立了低压断路器电弧的三维电弧仿真模型,计算了电弧弧柱收缩、等离子体喷流和电弧形态等现象;文[20]研究了低压断路器灭弧室内磁驱电弧的链式电弧数学模型;文[21]研究了电弧螺旋不稳定性影响因素。

电弧模型涉及气流场、热场、等离子体、电磁场等多个学科领域,问题本身非常复杂。高速电气化铁路弓网电弧还具有自身的特殊性:电弧可能受到高速动车运动引起的空气流动的影响、接触网和受电弓机械振动的影响和复杂大气环境的影响等,因而电弧模型的建立还需要考虑更多的因素。

2.2 电弧能量

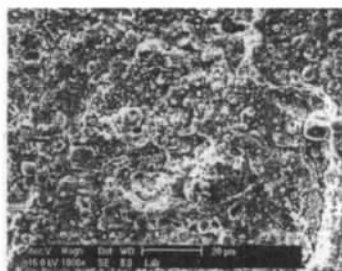
电弧能量大小是电极腐蚀的重要因素。国外的研究中,文[22-24]在电接触研究中指出:随着负载的不同,电接触中电弧的能量会发生很大的变化,电感负载下电接触中电弧的能量是灯负载下电弧能量的100倍左右,同时探讨了负载因素对电弧能量大小的影响;文[25]在研究浸金属碳滑板和铜接触线的载流摩擦中,把电弧划分为初始状态和稳定状态两个阶段,这两个阶段电弧能量与电极侵蚀量分别满足指数关系;文[26]认为电弧能量输入到电极有辐射传输和电弧通道传输两种方式,辐射传输过程是电弧能量损失的主要方式,电极表面所得的电弧能量是部分辐射传输和全部电弧通道传输之和;文[27]认为电弧能量是通过电弧侧面损失的,能量损失的多少和电弧的几何尺寸密切相关,并给出了电弧能量输入到电极表面的计算公式。国内的研究中,文[28]在测量断路器电弧侵蚀速率中使用电弧的能量来表征电弧的能量特征,指出了电量因素对电弧能量大小的影响;文[29]探讨了电压和电流参数对直流电弧的影响,认为电压会极大地影响电弧的能

量,电流对电弧能量的影响是线性的,同时阐释了电压和电流因素对电弧能量大小产生的影响。

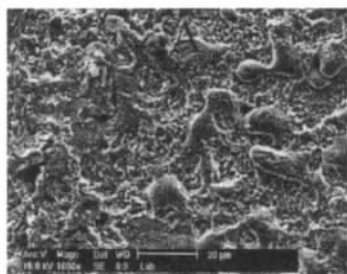
弓网电弧能量大小的影响因素,除上述因素外还包括牵引供电系统拓扑结构、负载的性质、电器元件的参数、电源电压和负载电流运行参数、受电弓运动速度、离线时受电弓在水平方向和垂直方向上的移动距离、空气流动状态等。

2.3 电弧侵蚀

电弧侵蚀分为喷溅侵蚀和蒸发气化侵蚀两种,而喷溅侵蚀是主要的侵蚀方式,喷溅是指在大电流条件下,触头表面发生熔化,液态金属以小液滴的形式从触头间飞溅出去的现象,它是电弧在热、力作用下发生的严重烧蚀行为^[30,31]。这种侵蚀受机械(分断次数、分断时刻、分断速度、触头尺寸、触头间距和形状)、材料(材料的物理化学性质参数、热力学参数、材料制备方法等)、电路(电弧电流电压、电路的负载特性)和环境因素(有无气吹和外加磁场、外界的压力变化)的影响^[32]。触头被侵蚀后形貌会发生变化,主要特征有形成氧化物带和富银区、产生孔洞、形成网状结构、产生裂纹等,见图1、2。



(a)阳极



(b)阴极

图1 电弧侵蚀后受电弓滑板表面形貌



图2 电弧侵蚀后受电弓滑板表面裂纹

电弧侵蚀会引起材料的转移,在这方面比较能被

接受的理论是 PSD 模型和由 Swingler 和 McBride 改进后的 PSD 模型。模型中把材料转移分为 5 个阶段:金属离子阶段;阴极材料向阳极阶段;蒸发阶段;阳极材料转向阴极阶段;大电流下的金属转移阶段^[33]。

对电弧侵蚀的研究方法有以探针摄影法^[34]为主的直接测量法和以干涉法和以激光共焦法^[33]为主的非直接测量法。直接测量法比较直观,但是无法测量小于探针直径的“点洞”;非直接测量法测试条件要求高,但测试结果精度高,失真小。

2.4 载流摩擦磨损

电气化铁路系统(包括轻轨)的弓网受流系统是载流摩擦磨损的一个重要的研究方向。国外很早就开始了相关的研究,重点在载荷、速度、润滑、电流大小和电弧等物理条件和电学条件下,对电场中受电弓滑板的摩擦学性能和接触行为的影响^[35,36]。国内也在浸金属碳滑板、碳纤维滑板、复合材料滑板等方面进行了积极的研究,取得了一定的进展。这些研究认为:在载流摩擦中,电因素的介入对摩擦磨损有重要的影响,其中电场、电流以及电弧的作用都将极大地改变受电弓滑板的摩擦学性能^[37]。载流条件下摩擦副在摩擦过程中的热量主要来自 3 个方面:电弧热、摩擦热和电流在摩擦面上产生的焦耳热。电流越大,电弧热和焦耳热就越大,受电弓滑板表面温度越高,引起导线和滑板的塑性变形,摩擦表面需要克服塑性变形所做的功变大,磨损更加严重^[38]。

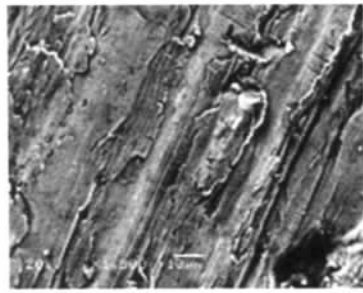
电弧导致的磨粒磨损会在摩擦副表面产生氧化形成硬质点,硬质点在磨损过程中剥落,再加上电弧飞溅形成的微小颗粒,成为第 3 相(磨粒)^[39]。

电弧还会导致电弧熔化和侵蚀。当摩擦接触断开时,导线和滑板之间会产生电弧而侵蚀滑板和导线。电弧产生时在电弧放电周围温度极高,会引起滑板和导线中低熔点元素发生熔化和蒸发,在随后的凝固过程中形成气孔和球形粒子。摩擦表面会因电弧放电而产生电蚀坑、表面氧化膜和气孔等^[40],见图 3。

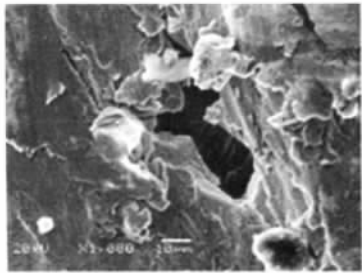
3 弓网电弧产生机理

在电气化铁路中,受电弓与接触导线接触滑动是牵引供电网与车载电气传动系统相联系的关键环节。在理想的运行状态下,受电弓把这两部分从电气上连接起来,而分离开来是一种不正常的运行状态。而从受电弓的实际运行过程看,受电弓不仅要要把这两部分从电气上连接起来,也要把这两部分从电气上分离开来。

牵引供电基本结构见图 4(a)。电流从地面牵引降压变压器的二次侧送入接触网,受电弓从接触网取流,经过车载牵引变压器高压侧,流入钢轨,再由钢轨回到地面牵引降压变压器的二次侧,形成电流



(a) 表面形貌



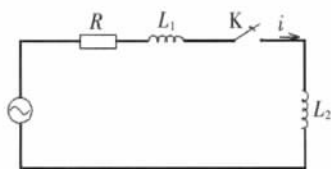
(b) 气孔放大图

图3 电弧热作用后,接触网导线摩擦表面

回路。当受电弓与接触导线分离的瞬间,其等效电路见图4(b)。在图4(b)中, R 代表牵引回路的总电阻, L_1 代表地面牵引变压器等效电感、与牵引电流有关接触网电感和钢轨电感之和, L_2 代表车载牵引变压器的等效电感,用开关 K 的断开等效弓网分离的状态。



(a) 牵引供电基本结构图



(b) 牵引供电基本结构等效电路图

图4 牵引供电基本结构

从等效回路可以看出,当回路中有电流 i 时,如果断开开关 K ,则整个回路中的电流由 i 变为零。如果这一变化过程的时间 $t \rightarrow 0$,由 $u = (L_1 + L_2) di/dt$ 可知,在电感中引起的电压 $u \rightarrow \infty$,这一电压可以击穿任意绝缘强度的绝缘介质!但在实际工程中,有两方面的原因制约了这一过电压。一个原因是线路分布电容的存在,当线路上有分布电容 C 时,电感在开关上所产生的电压大小为 $u = \sqrt{(L_1 + L_2)/Ci}$,回路中的磁场能转换为电场能。线路的分布电容与回路的电感相比非常的小,所以在开关 K 上由电感产生的过电压还是非常大。第2个原因是电流 i 变化到零的时间并不是无穷小,当电流变化率很大的时候,

在开关上产生很大的电压,由于开关实际上是一个有一定绝缘强度的气隙,在过电压作用下气隙被击穿,气隙电阻迅速减小,电感中的电流变化率又降低。当电感中的电流变化率降低后,开关 K 上的电压减小,气隙的绝缘强度开始恢复,气隙电阻增大。这一过程一直持续到回路中的电流到零为止。电流由 i 变化到零的时间取决于气隙绝缘强度的恢复速度和开关上电压的上升速度。电流由 i 变化到零的过程实际上就是弓网间的燃弧过程,而电弧耗散了回路中的绝大部分磁场能量。在电弧的能量消耗中,除了回路的磁场能量外,电源电势也会提供一定的能量。

4 弓网电弧的特征

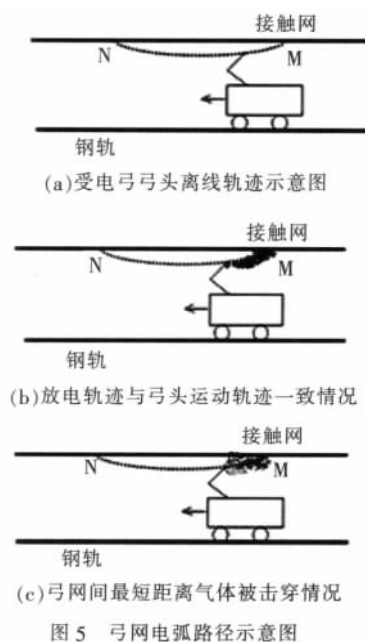
弓网电弧产生后,会有一定的能量耗散,这部分能量来自两个部分:一是电源提供的能量;一是在回路电感中储存的磁场能量。两者的比例关系以及不同因素对弓网电弧能量的组成成分的影响需要根据具体的电路结构确定。

弓网电弧的熄灭过程是影响能量在时间上分布的一个重要环节。一种情况是电弧产生后,随着受电弓的运动电弧被越拉越长,最后电源的电压不足以维持电弧的继续延伸而熄灭;另一种情况是产生电弧后,受电弓运动一段距离后与接触导线重新接触,使电弧两端的电压消失而导致电弧熄灭。

弓网电弧的路径是弓网电弧能量在空间上分布的重要表现形式。受电弓在接触导线上滑动运行过程中,由于多种因素的影响受电弓会在接触导线上弹跳,其运动轨迹见图5(a),从某一点开始受电弓与接触导线分离,受电弓的弓头沿一条弧线向前运动,然后再与接触导线接触。在受电弓弹跳运行的过程中,会有电弧产生。其放电路径一种情况是放电路径和受电弓弓头的运动轨迹大致一样,见图5(b),在电场的作用下,受电弓和接触网间的空气气隙沿最短的路径被击穿,被击穿的气体具有良好的导电性能,当受电弓弓头向前运动时,被电离的气体和受电弓弓头间的微小气隙继续被击穿,通过这一过程的逐步发展,放电路径与受电弓弓头的路径大致是一致的;另一种情况是受电弓弓头离线运动,与接触导线的垂直距离很小,而电弧的发展是一个振荡过程,在振荡过程中受电弓弓头与接触导线间的最短距离的空气气隙被击穿,其放电路径见图5(c)。

5 结语

弓网电弧侵蚀磨损接触导线和受电弓滑板、产生过电压和高频噪声影响机车供电质量。随着我国电气化铁路的发展,弓网电弧已成为影响机车速度继续提高的直接因素,有必要对其进行深入的研究。开关



设备的电弧模型、触头材料的电弧侵蚀、电弧能量和载流摩擦磨损已有参考和借鉴的研究理论，而弓网电弧的产生和熄灭机理、影响因素、时空分布规律、传输特性尤其是其危害的抑制和消除方法还有待于进一步开展。

参考文献：

- [1] 金学松, 温泽峰, 张卫华, 等. 世界铁路发展状况及其关键力学问题 (特邀报告)[C]// 第13届全国结构工程学术会议论文集(第 册), 北京: 清华大学出版社, 2004: 96-100.
- [2] 刘波. 电力机车弓网离线检查装置 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [3] 郭艳玲, 王洪涛, 孙树朴. 牵引电网过电压产生机理及测试研究[J]. 电工技术杂志, 2002(9): 25-27.
- [4] CASSIA A M. Theorie Nouvelle Des Arc De Rupture Et De Larigidite Des Circuit [C]// CIGRE, 1939: 102.
- [5] MAYR O. Theorie Des Statischen Und Des Dynamischen Lichtbogens[J]. Arehivf, Elektrotechnik, 1943(12): 588.
- [6] COWLEY M D. Integral Method of Arc Analysis [J]. Application of Physics, 1974(7): 2 218-2 222.
- [7] SWANSON B W, ROICLT R M. Boundary Layer Analysis of an SF₆ Circuit Breaker Arc [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1971, 5(3): 1 086.
- [8] HERMANN W, RAGALLER K. Theoretical Description of the Current Interruption in HV Gas Blast Breakers [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(5): 1 546-1 555.
- [9] LOWKE J J, LOCKI H C. A Simple Model for High Current Arc Stabilized by Forced Convection [J]. Application of Physics, 1975(46): 3 325-3 329.
- [10] CASYE M T, FANG D B. A Current Zero Arc Model Based on Forced Convection [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1979, 7(4): 217-229.
- [11] LOWKE J J. Two-dimensional Calculation of Properties of Arcs in High Speed Flow [C]// Int. Conf. on Gas Discharge and Their Application, London, 1982: 20.

- [12] KUWAHARA H, TANABE T, IBUKI K, et al. New Approach to Analysis of Arc Interruption Capability by Simulation Employed in the Development of SF₆ GCB Series with High Capacity Interrupter [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(7): 2 262-2 268.
- [13] MITCHELL R R, TUMA D T. Transient Two-dimensional Calculations of Properties of Forced Convection Stabilized Electric Arcs [J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1985, 13 (4): 207-220.
- [14] ZHANG X D, TREPANIER J Y, CAMARERO R. A Physical Model for the Numerical Simulation of Arco-blown Circuit Breakers[C]// In the Asp. Electromech. Energy Converters and Drives, 1993: 299-304.
- [15] PARK Y, FANG M T C. Mathematical Modeling of SF₆ Puffer Circuit Breakers I: High Current Region [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1991, 24(2): 98-102.
- [16] NOVAK J P, SC M, FUCKS V. Dynamic Equation and Characteristics of a Short Arc Moving in Transverse Magnetic field[J]. IEE, 1974, 121(1): 81-84.
- [17] MEUNIER G, ABRI A. Simulation of the Arc Interruption in Circuit Breaker [C]// Proc. 5th Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz (Poland), 1985: 105-109.
- [18] 刘晓明, 王尔智, 曹云东. 高压 SF₆ 断路器电弧动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 102-106.
- [19] 杨茜, 荣命哲, 吴翊. 低压断路器中空气电弧运动的仿真及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 89-94.
- [20] 张晋, 陈德桂, 付军. 低压断路器灭弧室中磁驱电弧的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 22-26.
- [21] 宫继全, 宫野, 刘金远. 气流对电弧螺旋不稳定性的影响[J]. 物理学报, 2002, 51(2): 291-295.
- [22] MORIN L, JEMAA N B, PINARD J, et al. Contacts Materials Performance under Break Arc in Automotive Applications [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(2): 367-375.
- [23] MORIN L, JEMAA N B, JEANNOT D. Make Arc Erosion and Welding in the Automotive Area[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23 (2): 240-246.
- [24] JEMAA N B, NEDELEC L, BENHENDA S. Break Arc Duration and Contact Erosion in Automotive Application[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology-Part A, 1996, 19(1): 82-86.
- [25] KUBO S, KATO K. Effect of Arc Discharge on the Wear Rate and Wear Mode Transition of a Copper-impregnated Metallized Carbon Contact Strip Sliding Against a Copper Disk[J]. Tribology International, 1999(32): 367-378.
- [26] SWINGLE J, MCBRIDE J W. Modelling of Energy Transport in Arcing Electrical Contacts to Determine Mass Transfer[C]// Proceedings of the Forty-second IEEE Holm Conference Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts, 1996: 105-114.
- [27] BORKOWSKI P, WALCZUK E. Thermal Model of Short Arc between High Current Contacts [C]// 47th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2001: 259-264.
- [28] 郭聪慧, 段文新, 杨志懋, 等. CuCr 触头材料电弧腐蚀速率的测定[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(2): 295-298.
- [29] 周玮, 臧春艳, 何俊佳. 电气参数和机械参数对继电器直流电弧的影响[J]. 中国电机工程学报, (下转第 127 页)

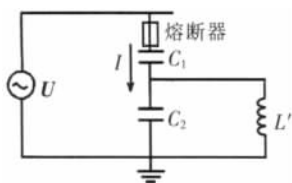


图7 熔断器产生过流电路

正常运行状态下励磁电抗和负载都很大,即 X_L' 很大,回路总电抗近似为 $(X_{C_1} + X_{C_2})$,当中压互感器铁心饱和时,励磁电抗 X_m 显著下降,相应的等值电感 L' 也要减小,当 $L' = 1/[\omega^2(C_1 + C_2)]$ 时将产生谐振,有可能出现某一分次谐波的振荡,常见的是 $1/3$ 次谐波振荡,此时电抗为零,回路电流最大。由于电网不断供给能量,回路中若没有适当阻尼,将会产生持续的分次谐波铁磁谐振,其过电压幅值可达额定电压的 $2 \sim 3$ 倍^[5]。 L' 离该值越近,等效阻抗越小,流过滤断器的电流 I 值越大,当熔断器电流长时间高于其额定电流时,熔断器就会熔断。

因此,在 CVT 产品设计制造时应改善 CVT 中压互感器的励磁特性,尽可能降低中压互感器铁芯的磁通密度,提高中压互感器的磁饱和点,选择伏安特性优越的中压互感器。为避免设备事故发生,仍需采取消除谐振的措施。从等值电路图 6 来看,最容易实现的方法是在 CVT 中压互感器的二次侧剩余绕组并联低值阻尼电阻。由于阻尼电阻与励磁电抗并联,且相对于励磁电抗很小,并联回路中阻尼电阻起主要作用,从而改变了电路结构,破坏了谐振条件,能有效阻尼、抑制或消除铁磁谐振的发生^[6]。且中压互感器伏安特性曲线拐点应高于 CVT 二次侧阻尼器伏安特性曲线的拐点,避免在过电压下,中压互感器先于阻尼器饱和形成谐振条件,失去了阻尼器的阻尼作用^[6]。

对于 35 kV 电容式电压互感器,由于电容分压器的高压电容 C_1 很小,相应的容抗很大,从而限制了短路电流的增加,避免了 35 kV 输电系统发生相对地短路事故。因此在 35 kV CVT 现行的电气设计安装中有逐步取消在一次侧串接高压熔断器的趋势。然而,为了避免由于 CVT 自身激发铁磁谐振而导致设备损坏事故的发生,从保护 CVT 设备本身的角度出发,仍应在一次侧加装高压熔断器。

3 结语

(1) 由于 CVT 中压互感器在系统过渡过程中铁心深度饱和,励磁电感显著下降并激发铁磁谐振产生过电流导致高压熔断器熔断。

(2) 在 CVT 中压互感器二次剩余绕组并联阻尼器是抑制铁磁谐振的有效措施。在产品生产制造时,应着力改善 CVT 中压互感器的空载励磁特性,选择伏安特性优越的中压互感器。

(3) 为了避免由于 CVT 铁磁谐振而导致设备损坏事故的发生,从保护 CVT 设备本身的角度出发,应当在一次侧加装高压熔断器。

参考文献:

- [1] GB/T 4703-1984. 电容式电压互感器[S].
- [2] 刘晓辉, 应肖磊. 电容式电压互感器二次电压异常的分析及改进建议[J]. 浙江电力, 2004(4): 74-76.
- [3] 穆淑云. 电容式电压互感器暂态性能的仿真计算[J]. 电力电容器, 2001(1): 8-13.
- [4] 周小梅, 杨以涵. 配电网 PT 高压熔断器熔断的原因分析[J]. 现代电力, 2007(4): 34-37.
- [5] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [6] 夏长根. 一起 35 电容式电压互感器爆保险分析[J]. 电力电容器, 2006(3): 32-35.

(上接第 108 页)

2006, 26(19): 151-155.

- [30] 王可健, 王其平. 分断电弧对触头材料侵蚀的研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 22(3): 99-106.
- [31] 吴细秀, 李震彪. 电极材料喷溅侵蚀模型评述[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 38-41.
- [32] 吴细秀, 狄美华, 李震彪, 等. 电触头侵蚀研究概述[J]. 低压电器, 2003(5): 6-10.
- [33] SAWA K. Recent Research and New Trends of Electrical Contacts[J]. IEICE Trans. Electrode, 2000, 10(9): 1 363-1 376.
- [34] Mc BRIDE J W. The Volumetric Erosion of Electrical Contacts[J]. IEEE Trans. on Packaging Technology, 2000, 23(2): 211-221.
- [35] 李占军, 孙乐民, 张永振. 载流摩擦磨损研究现状及前景[J]. 铁道运输与经济, 2005, 27(1): 82-84.
- [36] 李 鹏, 张永振, 孙乐民. 受电摩擦磨损的研究现状[J]. 河

南科技大学学报, 2002, 23(4): 34-37.

- [37] 马行驰, 何国求, 陈成澍, 等. 现代轨道交通摩擦集电材料及相关载流摩擦磨损研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(3): 63-65.
- [38] 郜建新, 宋克兴, 田保红, 等. 载流条件下 Al_2O_3/Cu 复合材料的摩擦磨损特性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2007, 30(1): 14-15.
- [39] KUBO S, KATO K. Effect of Arc Discharge on Wear Rate of Cu-impregnated Carbon Strip in Unlubricated Sliding Against Cu Trolley under Electric Current[J]. Wear, 1998(216): 172.
- [40] 贾淑果, 郑茂盛, 刘 平, 等. 在加载电流作用下 Cr 对 Cu-Ag 合金磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(5): 484.