

牵引变电所内一次系统与二次系统的电磁兼容

杨焯成 华东交通大学电气系 南昌 (330000)

【摘要】 本文论述了电气化铁道牵引变电所内电磁干扰的来源及其特性,干扰机理和计算原理与方法,指出研究牵引变电所电磁兼容的必要性及研究的途径。

【关键词】 牵引变电所 二次系统 微机综合自动化系统 电磁干扰

1 引言

随着铁道电力牵引向高速、重载、大运量发展,牵引变电所和供电系统的容量增大,对控制保护功能、监测控制的精确度与分辨力、控制自动化与智能化程度等多方面的要求不断提高,沿用传统的模拟电表组成的监控系统和继电保护自动化装置,已难以满足现代化电牵引供电系统的需要。90年代以来,多微机监控、保护提供了自动化和智能化的手段。另一方面,数字化的二次系统向集成化和高速化方向发展,其工作电压已降到几伏(0~5V),信号电压也很小,工作频带宽,且正好与一次系统干扰源同频段,使其对外界干扰的敏感性远大于传统的控制设备,导致使其误动或遭受破坏的干扰信号的幅值和能量也更小。同时,微机监控系统,微机保护和自动化装置、通信线及各种电缆与一次电气系统及其他变电所相连,要使用较长的通信线与电缆,使它们极易受到干扰。牵引变电所内电磁兼容成为电气化铁道的重要课题。目前,仅局限于对具体变电所的局部保护研究,还缺乏系统的研究。本文根据牵引变电所的特点,分析论述其中的电磁干扰源及其特性,干扰机理和计算原理与方法。

2 高电压静电感应干扰

2.1 静电感应干扰源

牵引侧的高压(27.5kV)在其周围空间形成电场,通过高电压部位与二次系统之间的互电容耦合,对其产生静电感应电压或流过静电感应电流。当这种感应电压或电流达到某一数值时,会造成二次设备的误动作或毁坏。牵引变电所中所有高电压部位均是静电感应干扰源。

2.2 静电感应电压、电流的计算原理

设牵引变电所中一次系统的各导体与二次系统中各导体及大地组成一个线性介质中的静电独立系

统。该系统中电场的分布与系统内各导体的形状、尺寸、相互位置及电介质的分布等因素有关,其关系可用部分电容等值参数来描述,即每一对导体间都有一个部分电容,对于一个由 $(n+1)$ 个导体组成的多导体系统,共有 $n(n+1)/2$ 个部分电容。于是该系统可用一个静电电容网络来模拟。

以牵引侧只有高压导体 i 与二次系统中只有导体 j 的简单情况说明计算基本原理。如图1所示。

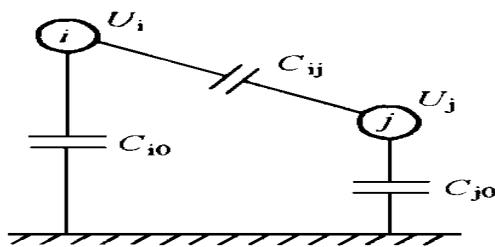


图1 静电电容网络

图中 U_i —高压导体 i 的电压(如27.5kV)

U_j —二次导体 j 的电压

C_{i0} —高压导体 i 对地电容

C_{j0} —二次导体 j 对地电容

C_{ij} —高压导体 i 与二次导体 j 之间的互电容

部分电容参数可用镜像法计算或现场实测得到。计算原理如图2所示。

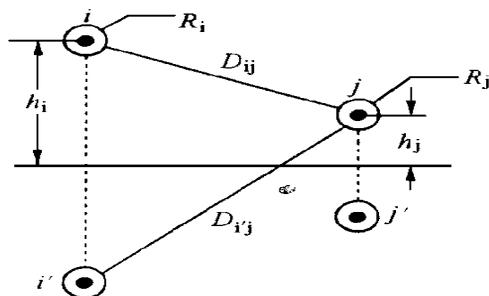


图2 镜像法计算部分电容

i' 、 j' 分别为导体 i 与 j 的镜像。

求得:

$$C_i = \frac{2 \cdot 0}{R_j} \ln \frac{2h_i}{R_j} \cdot \frac{D_{ij}}{D_{ij}} \quad (1)$$

$$C_{j0} = \frac{2 \cdot 0}{R_i} \ln \frac{2h_j}{R_i} \cdot \frac{D_{ij}}{D_{ij}} \quad (2)$$

$$C_{ij} = C_{ji} = \frac{2 \cdot 0}{D_{ij}} \ln \frac{D_{ij}}{D_{ij}} \quad (3)$$

$$\text{式中} \quad = \ln \frac{2h_i}{R_i} \times \ln \frac{2h_j}{R_j} - \left[\ln \frac{D_{ij}}{R_{ij}} \right]^2$$

从图 1 计算二次导体 j 上静电感应电压与电流有二种情况:

当二次线路距地面较近时, 即有 $h_j \ll h_i$ 时, 则有 $C_{j0} \gg C_{i0}$, 可得

$$U_j = U_i \frac{C_{ij}}{C_{j0} + C_{ij}} \quad (4)$$

$$I_j = U_i \frac{C_{ij} C_{j0}}{C_{j0} + C_{ij}} \quad (5)$$

从式(4)、(5)可知, 一次电压 U_i 愈高, 产生的静电干扰则愈强; 高压部位距二次设备愈近, 受静电干扰愈严重。

当二次线路接近一次线路时, 即有 $h_i, h_j \gg D_{ij}$ 时, 则有:

$$U_j = U_i \frac{2C_{ij} + C_{j0}}{2C_{ij} + C_{j0}} U_i \quad (6)$$

$$I_j = C_{j0} U_j \quad C_{j0} U_i \quad (7)$$

对微机综合自动化系统的数据采集、控制单元和微机保护单元等子系统, 就地放置在高电压开关柜内或高电压配电装置及其它一次设备附近, 各子系统与监控主机间用网络电缆或光缆接为整体。显然, 这些二次设备或线路上静电感应电压与电流应用式(6)、(7)计算。此时要求各子系统有更高的抗干扰能力。

牵引变电所内的实际情况更为复杂, 高压设备众多、形状各异、各牵引变电所的布置情况也互不相同, 因此对静电感应干扰难以建立数学模型, 即使针对某一牵引变电所建立了模型也不一定适合于别的牵引变电所。以上分析只是对实际情况作了适当简化后, 作原理上的论述说明。目前, 还未见到牵引变电所静电感应干扰的数值计算方法。用静电电位测量仪器对现场实测还是有效的办法。

3 载流导体电磁感应干扰

3.1 电磁感应干扰源

牵引网上带有负荷时, 牵引变电所内载流导体(如母线、电缆等)流过交流大电流, 通过电感耦合, 一次大电流在二次线路上感应出干扰电压。

由于在一个供电区内运行的列车数目常常变化, 而且各列车在运行中受到不断变化的阻力影响, 其运行状态也在不断变化, 使牵引负荷变化随机性大。由此产生的磁场及其产生的感应电压也随之变化。所以载流导体是不可忽视的电磁干扰源。

3.2 磁场的计算

计算载流导体的磁场一般有二种情况:

其一是, 载流导体处于线性无限大导磁媒质中, 则其周围空间任一点的磁感应强度 B 可由毕奥—沙伐尔定律计算。

其二是, 载流导体的上、下两侧(或一侧)有不同磁媒质, 则可用镜象法和叠加定理分别计算出每一种媒质的磁感应强度 B 。

线性媒质中磁感应强度 $|B|$ 与产生它的电流 I 成正比, 即

$$|B| = KI \quad (8)$$

式中 K 一由载流导体的形状、尺寸、场域中磁媒质及场点与场源之间距离决定的系数。

上述两种情况计算出来的 B , 都是考虑牵引变电所内实际情况对磁场的削弱作用, 用乘以与铁路股道有关的屏蔽系数 K_1 、环境综合屏蔽系数 K_2 及与供电方式有关的屏蔽系数 K_3 来等效处理, 即

$$|B| = KK_1 K_2 K_3 I \quad (9)$$

当牵引网处于短路状态时, 比正常工作电流大得多的短路电流的磁场, 对二次系统产生很高的电磁感应电压。此时磁感应强度的计算用乘以冲击电流系数 K_{cg} 来等效考虑, 即

$$B = K_{cg} |B| \quad (10)$$

4 地网电流对二次系数的干扰

4.1 地网电流干扰源

电力机车通过受电弓从接触网上取得牵引电流驱动机车。接触网和钢轨构成回路, 牵引电流经钢轨、回流线、变压器回到接触网。但是由于钢轨与地之间并不绝缘, 这就使牵引电流还有一部分经钢轨与大地之间的过度电阻流向大地, 经接地网返回变电所, 从而形成地网电流及相应的地电流场。

对二次线路有影响的地网电流有二种: 一种是短路时流过地网的工频电流; 另一种是侵入接地网的雷电流。牵引供电系统比一般电力系统短路故障率高、短路电流比正常工作电流大得多; 雷电流是幅值很大, 作用时间极短的冲击电流。因此接地网电流是牵引变电所内一个重要干扰源。

4.2 工频电流接地网的电路模型

牵引变电所的接地网,一般由垂直接地体、水平接地体和均压带构成。接地网与其所在处的土壤组成一个不良导电媒质中的多导体系统。以下实际情况应考虑到:

4.2.1 电流流经土壤所遇到的电阻主要集中在接地体附近,距接地体足够远处的电位为零;

4.2.2 可近似地视接地体为等位面;

4.2.3 在工频条件下,只需考虑接地体电阻 R 、电感 L 以及对地电导 G ,可忽略接地体对地电容 C 。

考虑以上实际情况,单元接地体可用 T 型等效电路模拟,如图 3 所示。

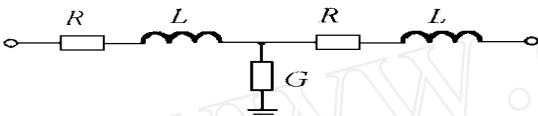


图3 单元接地体 T 型等效电路

图中 R —接地体电阻,由它的几何形状、尺寸与材料的电阻率计算。

L 、 G —接地体的电感和对地电导,它们分别与接地体的形状、尺寸及埋入方式、土壤磁导率和电导率等因素有关。可采用镜像法计算。

对于 N 根单元接地体组成的接地网,当忽略各单元接地体之间的互感时,可用 N 个图 3 中的 T 型等效电路组成的等效网络模拟。

4.3 地网电流、电压计算

4.3.1 接地网中任一单元接地体的电流 i_k 、电压 \dot{U}_k ,可通过对等效网络建立电路方程来计算。

4.3.2 由电磁场理论知,地电流场中任一点 P 的电流 i_p 与电压 \dot{U}_p 的关系为

$$\dot{U}_P = \sum_{k=1}^N p_{pk} \dot{I}_p \quad (11)$$

式中 p_{pk} —为第 k 根单元接地体对 P 点的电位系数。它与接地体的形状、尺寸、埋设方式、土壤的电导率及接地体与场点之间的距离等因素有关。可通过对电流场的计算求得。式(11)中 \dot{U}_P 、 \dot{I}_P 也可分别是地网中某接地体的电位、电流。因此,联立求解 4.3.1 中等效网络方程组和式(11),即可求得电流、电压的分布。

4.4 地网工频电流对二次线路的干扰电压

单位长的第 j 条二次线路由地网工频电流 i_k 产生的感应电压 \dot{U}_j 为

$$\dot{U}_j = \sum_{k=1}^N M_{kj} \dot{I}_k \quad (12)$$

式中 i_k —第 k 根单元接地体的电流;

M_{kj} —第 k 根单元接地体与第 j 条二次线路单位长之间的互感。

4.5 地网分布电流的磁场

流入地中的分布电流产生磁场的效应,可用设置于地网中心距地面深为 D_g 处的集中镜像电流 I 来等效代替。如图 4 所示。

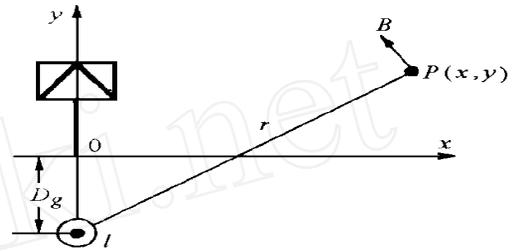


图4 地网分布电流的磁场

图中 $D_g = 0.2085 \sqrt{10^7 / f}$

—土壤电阻率

f —地网电流频率

地面上任一点 $P(x, y)$ 的磁场应为载流导体电流和地网分布电流共同产生,而图 4 中地网镜像电流在 P 点产生磁感应强度 B 为:

$$B = K_1 K_2 K_3 \frac{\mu_0 I}{2} \frac{1}{\sqrt{(y + D_g)^2 + x^2}} \quad (13)$$

式中 μ_0 —空气的导磁系数

K_1 、 K_2 、 K_3 —意义与 3.2 中同。

处于地面的二次线路,同时受到载流导体的电磁感应干扰和地网电流的电磁干扰。

4.6 地网雷电流对二次线路的感应电压

雷电流侵入地网,应考虑单元接地体的电感 L 、对地电导 G 和对地电容 C ,而忽略接地体的电阻 R 。于是,单元接地体可用 T 型等效电路模拟。并要考虑相邻 T 型等效电路之间的互感,如图 5 所示。

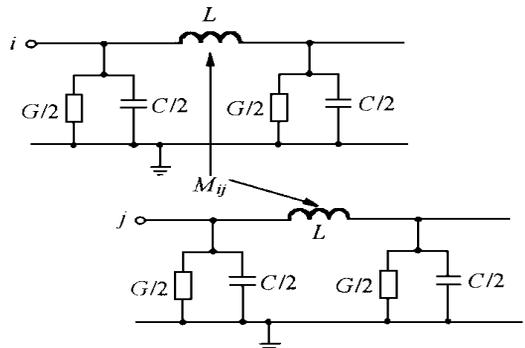


图5 单元接地体 T 型等效电路及它们之间的互感
整个接地网用 N 个 T 型等效电路组合的等效网

络模拟。对等效网络列状态方程组并求解地网雷电流 i_k 。二次线路上的感应电压 u 为

$$u = \sum_{k=1}^N M_{kj} \frac{di_k}{dt} \quad (14)$$

式中 i_k —第 k 根单元接地体的雷电流
 M_{kj} —第 k 根单元接地体对第 j 条二次线路的互感系数

二次系统的微机极易受到雷电流冲击电流的干扰,严重时被破坏。

5 谐波电流的干扰

5.1 谐波特性参数

由于电力机车采用了整流电路、受电弓运行中跳弓拉弧等原因,使接触网电流除基波电流 I_1 外,还有丰富的谐波电流 I_n 。谐波电流的谐波次数、幅值大小与整流电路的形式、负荷大小、机车工况、牵引网参数等多种因素有关。例如:韶山型电力机车采用中点抽头式整流电路,一般情况下产生奇次谐波,各次谐波有效值 I_n 相对于基波的有效值 I_1 的比值 K_i 如表 1 所示:

表 1

谐波次数 n	3	5	7	9	11	13	15	...
$k_i = I_n/I_1$	0.21	0.10	0.06	0.04	0.025	0.016	0.011	...

5.2 谐波电流对二次系统的干扰

谐波电流对二次系统的干扰,主要有以下几种方式:

5.2.1 基波电流和谐波电流都会产生相应频率的交变磁场,通过电感耦合对二次系统产生感应电压。因此,计算磁感应强度的式(9)应为

$$B = KK_1 K_2 K_3 I \sqrt{\sum_{i=3}^n k_i^2} \quad (15)$$

式(13)应为

$$B = KK_1 K_2 K_3 \frac{\mu_0 I}{2 \sqrt{(y + D_g)^2 + x^2}} \sqrt{\sum_{i=3}^n k_i^2} \quad (16)$$

式(12)应为第 i 次地网谐波电流 i_{ki} 对第 j 条二次线路单位长的感应电压 \dot{U}_{ji} 为

$$\dot{U}_{ji} = j(i) \sum_{i=1}^n M_{kj} \dot{i}_{ki} \quad (17)$$

5.2.2 由于变压器铁芯的非线性,高次谐波电流使电源电压波形畸变,电源的高次谐波电压通过电容耦合到高压部位周围空间的二次设备或线路上,

产生高次谐波静电感应电压。

各次谐波感应电压引起的干扰程度不同,国际上把 800Hz 的干扰定为 1,其它频率的干扰折合为 800Hz 的干扰。折合系数为 S_n ,则各次谐波引起的总干扰电压 U 为

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^N (S_n U_n)^2} \quad (18)$$

式中 U_n — n 次谐波电压有效值。

6 瞬变电磁场干扰

牵引网由于移动负荷和工作环境差致使故障率高,牵引变电所内用于正常或短路时接通或断开主电路的断路器、隔离开关等开关电器操作频繁。它们是二次系统的主要干扰源。其干扰机理用断路器断开短路故障电路来说明。

断路器开断,短路电流迅速减少至零。此瞬变电流 (di/dt 值很大) 在触头间感应出幅值很高的尖峰脉冲电压(尖峰持续时间几秒),使触头间产生电弧而使电压下降,当电压下降到不能维持电弧时,电弧熄灭;触头再次感应出电压脉冲,再次起弧。从熄弧到再次起弧的间隔时间为微秒级。开关动作伴随着多次电弧重燃,每次熄亚、重燃都产生尖峰脉冲电压和频率振荡电流,其中还包含有工频及低频振荡电流。一次线路中的这种振荡和短脉冲电压,恰好与微机监控系统经常要处理大量的开关量和脉冲量同频段,使监测和保护等二次系统特别容易受到影响,尤其对高速运行和传递数字逻辑信号的微机、计算机干扰更为严重。这种干扰侵入电源网线,通过电源影响微机、计算机的正常工作或带来毁灭性的破坏。同时,通过地网电流和电感耦合对二次系统引起共模干扰电压。因此,开关电器操作是牵引变电所内微机综合自动化系统最主要和危害最大的干扰源。

干扰程度取决于干扰源的频率,场强及计算机自身的电磁敏感度。

7 牵引变电所电磁兼容的特点

牵引变电所内电磁干扰源和干扰信号传输方式多种多样;影响电磁干扰的因素错综复杂;干扰信号频带宽,还正好与二次系统工作频带同频段;电气化铁道的特点使干扰频繁,且随机性大。因此,牵引变电所内的二次系统不仅极易受到电磁干扰;而且干扰严重。可见,牵引变电所内的电磁兼容是电气化铁道的必须认真研究的课题。

牵引变电所内电磁环境复杂,电、磁及电磁干扰同时影响二次系统,且各种干扰相伴而生。目前,对一些干扰现象还难以建立准确的物理模型或数学模型,影响对电磁干扰的特性、强度进行定量的分析计算。笔者认为,牵引变电所电磁兼容课题的研究可从两方面进行:一方面对干扰源的特性、干扰信号传输途径及干扰机理等进行理论研究,进而可深入定量分析计算;另一方面,研究模拟实验和现场实际测量的方法,通过实践研究积累资料和经验,为理论研究提出可靠的参照。

参考文献

1 葛马信山等. 电磁场基础. 北京:清华大学出版社,1995,:

42~48.

- 2 湖北省电磁兼容学会. 电磁兼容性原理及应用. 北京:国防工业出版社,1996, :154~163.
- 3 刘鹏程. 电磁兼容原理及技术. 北京:国防工业出版社,1993, :11~15.
- 4 张志远. 电气化铁道对地震台站电磁影响的研究. 铁道学报,1993,15(3).
- 5 林福昌等. 变电所强电设备与弱线路的电磁兼容问题. 中国电力,1996,1:37~39.

收稿日期:1998—09—22

杨焯成 女,1943年出生,付教授,长期从事电工电子理论的教学及科研工作。

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE ON PRIMARY AND SECONDARY SYSTEM OF TRACTION SUBSTATION

Yang Yecheng (Electric Engineering Department of East China Jiaotong University ,Nanchang ,330013)

Abstract Source and characteristic and mechanism and calculating method of electromagnetic interference are analyzed in this paper. Research necessary and channel of electromagnetic interference of traction Substation are put forward for related department reference.

Key words Traction substation Secondary - system Micro - computer synthesize automatic system Electromagnetic interference

(上接7页)样同步方法. 电力系统自动化,1996,(9).

- 13 杨维娜,鲍伟廉. PCM系统传送继电保护数据的信号处理. 电力系统通信,1992,(2).
- 14 许建德,陆以群. 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式. 电力系统自动化,1993,(4).
- 15 T. Einaraon et al. Experiences of current differential protections for multi-terminal power lines using multiplexed data transmission systems. CIGRE 1994:34-203.
- 16 Fesler E et al. Development of Digital E. H. V Line Differential

Protection Relay. International Control. Beijing,1994.

收稿日期:1998—07—23

廖泽友 男,1964年生,在读博士生,主要研究方向为电力系统微机保护与自动化。

鲍伟廉 男,1931年生,教授,主要研究方向为电力系统通信。

杨维娜 女,1937年生,教授,主要研究方向为电力系统通信。

CURRENT STATE AND PROSPECT OF HV LINE CURRENT DIFFERENTIAL PROTECTION

Liao Zeyou, Bao Weilian, Yang Weina, Yang Qixun, Cai Hu
(North China University of Electric Power, Beijing, 100085, China)

Abstract Current differential protection is an important developing direction of HV line main protection. This paper simply describes the history and current state of HV line current differential protection, discusses its feature, action and significance in HV line protection, and looks ahead its application prospect. Finally, the paper introduces some latest informations about the HV line current differential protection research and some features of HV line digital fibre-optical separated phase current differential protection which is being developed by the Hathaway Sifan Corporation in Beijing.

Key words Current differential protection Line protection Data communication Synchrosampling