

电力牵引变电所二次电缆共模干扰的数值算法

杨焯成

(华东交通大学,江西 南昌 330013)

【摘要】 结合电力牵引变电所基本电磁环境的特点,应用传输线理论,采用分布源传输线模型,通过链形等效网络和等效阻抗简化电路模型,求得计算电力牵引变电所两端接地屏蔽电缆共模干扰的数值算法;降低与控制共模干扰的措施。

【关键词】 电力牵引变电所; 屏蔽电缆; 共模干扰; 数值算法

1 引言

电气化铁道对沿路通信线路影响防治的研究已有不少成果。随着牵引供电系统继电保护向远动技术发展,电气化铁道对其牵引供电系统继电保护系统的影响已引起关注。但牵引变电所内电磁环境十分复杂、难以建立数学模型和定量的分析计算。目前,干扰影响的定量分析还很有限。本文针对牵引变电所电磁环境特点,应用传输线理论,采用分布源传输线模型,通过链形等效网络和等效阻抗简化电路模型,分析推导得计算电力牵引变电所两端接地二次屏蔽电缆屏蔽层或金属护套(简称金属外皮)对地电压及外皮电流的数值算法,以及减少和控制干扰影响的措施。可供电力牵引供电系统远动化技术参考。

2 牵引变电所内的基本电磁环境及其特点

2.1 电力牵引网高电压、变化剧烈的牵引电流产生强电磁场

牵引变电所变压器牵引侧将 27.5kV 电压送至接触网驱动电力机车运行。牵引网电流随着取流机车台数、供电方式及运行状态等情况而定,一般为数百安到近千安的大电流。而且由于列车的多种运行状态,使牵引电流剧烈变化。显然,牵引变电所内一次送配电设备在其周围会产生强电磁场。

2.2 牵引网的结构特点产生地中电流

牵引电流沿接触网供给电力机车,再经轨道和大地流回牵引变电所,因此在大地中产生呈分布状的地中电流。由于轨道与地之间的过渡电阻往往较大,所以牵引电流除有沿轨道流回变电所的外,大部分是趋向接地网经由接地网流回变电所,使接近变电所的地中电流密度大;另外,地中电流的分布还受

土壤各处不同的电导率值、牵引变电所地下的钢筋混凝土结构、地下埋设金属管道及金属表皮电缆等情况的影响,使变电所及其附近的地下电流密度偏大及分布奇异。因此,在牵引变电所内地中电流产生分布复杂的电磁场。

2.3 牵引电流中的谐波分量产生谐波电磁场

电力机车采用整流装置及机车运行中受电弓跳弓拉弧等原因,使牵引电流中除基波电流外,还含有丰富的谐波电流。故由一次设备产生的电磁场具有频带宽的特点。

除上述基本干扰电磁场外,还有因一次开关设备频繁操作和雷电袭击所产生的瞬变干扰电磁场。电力牵引变电所内干扰电磁场,对与一次送配电设备靠近的微机保护和探测装置的二次电缆是强干扰源,二次电缆会成为外界电磁能的巨大收集器,并通过它传送到与电缆接口的终端设备中,就会在设备的小信号电路中产生不容许的干扰影响而导致误动作、或造成设备元器件损坏。

通过二次电缆耦合的电磁干扰,主要表现为与二次电缆接口的二次设备和系统的共模干扰与差模干扰。共模干扰的计算,即计算电缆金属外皮对地电压与外皮上电流。以下分析推导基本电磁场对电缆共模干扰的数值算法。

3 计算共模干扰的传输线电路模型

3.1 结合牵引变电所干扰电磁场特点抽象模型

干扰电磁场频带宽,应考虑二次电缆的分布参数效应;牵引变电所电磁环境复杂,每段电缆所处电磁环境各异,应考虑分布源作用于电缆。

牵引变电所内二次电缆除有大量平行于地面布线外,还有不少垂直于地面引向靠近一次导体的监测和控制用电缆,而且它们通常位于水平电缆的始端或末端,它们比水平电缆更靠近干扰源或受干扰

影响的终端设备。因此,对垂直电缆的干扰影响更应关注,应分别采用与地面平行和与地面垂直的传输线模型。

3.2 平行于地面电缆的传输线电路模型

设与地面平行的电缆外皮与其地面的镜像当作一对两线传输线。如图 1 所示。

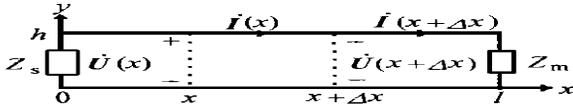


图 1 两线传输线模型

在 x_0y 平面上的两线传输线始、末端分别接有阻抗 Z_s 和 Z_m , 线长为 l , 间距为 h 。

由传输线理论得传输线的正弦稳态响应方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{U}(x)}{\partial x} + Z \dot{I}(x) = \dot{U}_e \\ \frac{\partial \dot{I}(x)}{\partial x} + Y \dot{U}(x) = \dot{I}_e \end{cases} \quad (1)$$

式中 \dot{U}_e 、 \dot{I}_e ——分别是牵引变电所内沿 x 方向传播的干扰电磁场在二次电缆外皮单位长度上的感应电压与电流^[7]。

$Z = R_0 + j L_0$ ——传输线单位长度阻抗;

$Y = j C_0$ ——传输线单位长度容抗。

各种结构电缆的单位长度阻抗和容抗,可用与电缆相关的参数计算而得。此处忽略传输线漏导。

于是,式(1)计算分布源的线元 dx 的等效电路模型如图 2 所示。

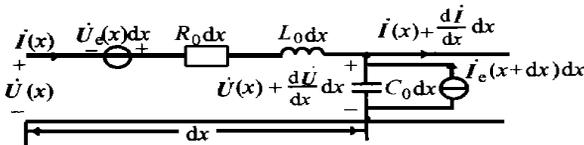


图 2 线元 dx 的等效电路模型

4 平行地面传输线响应电压、电流的数值计算方法

计算分布源传输线响应电压、电流的链形等效网络如图 3 所示。图中,用 N 个图 2 中单元二端口网络组成的链形网络来等效长为 l 的分布源传输线,既将长度 l 分成 N 个等长的单元线段,则每个单元线段长度 $l_i = l/N$, 每个线段用图 2 中所示二端口网络等效,这样,共有 $(N+1)$ 个节点,始、末端节点分别为 O 、 N ,且分别接有阻抗 Z_s 和 Z_m (可分别为电缆金属外皮两端的接地电阻); $\dot{U}_e(i)$ 和 $\dot{I}_e(i)$

($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 分别为第 i 段某频率分量的感应电压源和电流源。

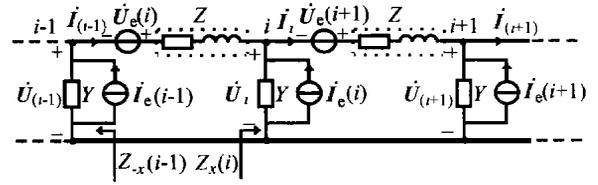


图 3 传输线链形等效网络

$$\dot{U}_e(i) = \dot{U}_e l_i, \quad \dot{I}_e(i) = \dot{I}_e l_i,$$

$$Z = (R_0 + j L_0) l_i, \quad Y = j C_0 l_i$$

计算传输线响应电压、电流时,先分别单独计算每个分布源作用下的响应,然后将各分布源作用下响应叠加。

设传输线在第 i 段感应电压源 $\dot{U}_e(i)$ 单独作用时(其余感应电源置零),则计算节点 $(i-1)$ 和 i 处的线间电压 $\dot{U}_{i,(i-1)}$ 和 $\dot{U}_{i,i}$ 的简化等效电路如图 4 所示。

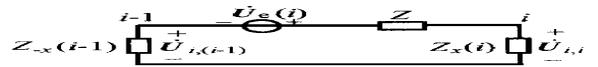


图 4 等效阻抗简化电路模型

图中 $Z_x(i)$ ——节点 i 处 x 方向网络的输入等效阻抗;

$Z_{-x}(i-1)$ ——节点 $(i-1)$ 处 $-x$ 方向网络的输入等效阻抗。

显然,在节点 N 与 0 处,等效阻抗 $Z_x(N)$ 与 $Z_{-x}(0)$ 分别为:

$$Z_x(N) = \frac{1}{(1/Z_m) + Y} \quad (2)$$

$$Z_{-x}(0) = \frac{1}{(1/Z_s) + Y}$$

而在节点 $(N-1)$ 与 1 处,等效阻抗 $Z_x(N-1)$ 与 $Z_{-x}(1)$ 分别为:

$$Z_x(N-1) = \frac{1}{\{1/[Z_x(N) + Z]\} + Y} \quad (3)$$

$$Z_{-x}(1) = \frac{1}{\{1/[Z_{-x}(0) + Z]\} + Y}$$

以此类推得:

$$Z_x(i) = \frac{1}{\{1/[Z_x(i+1) + Z]\} + Y} \quad (4)$$

$$Z_{-x}(i-1) = \frac{1}{\{1/[Z_{-x}(i-2) + Z]\} + Y}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N-1$$

$$\text{故: } \begin{cases} \dot{U}_{i,i} = \frac{\dot{U}_e(i) \cdot Z_x(i)}{Z + Z_x(i) + Z_{-x}(i-1)} \\ \dot{U}_{i,(i+1)} = \frac{\dot{U}_{i,i} \cdot Z_x(i+1)}{Z_x(i+1) + Z} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{i,(i-1)} = \frac{-\dot{U}_e(i) \cdot Z_{-x}(i-1)}{Z + Z_x(i) + Z_{-x}(i-1)} \\ \dot{U}_{i,(i-2)} = \frac{\dot{U}_{i,(i-1)} \cdot Z_{-x}(i-2)}{Z_{-x}(i-2) + Z} \end{cases} \quad (6)$$

于是,在第*i*段感应电压源单独作用时,任一节点*k*处的线间电压 $\dot{U}_{i,k}$ 的计算式为:

$$\dot{U}_{i,k} = \frac{\dot{U}_{i,(k-1)}}{Z_x(k) + Z} \cdot Z_x(k) \quad (k = i+1, i+2, \dots, N) \quad (7)$$

$$\dot{U}_{i,k} = \frac{\dot{U}_{i,(k+1)}}{Z_{-x}(k) + Z} \cdot Z_{-x}(k) \quad (k = i-1, i-2, \dots, 2, 1) \quad (8)$$

由图3得流过节点*k*的响应电流计算式为:

$$\dot{I}_{i,k} = \frac{\dot{U}_{i,(k-1)} - \dot{U}_{i,k}}{Z} - Y \cdot \dot{U}_{i,k} \quad (k = i-1, i-2, \dots, 2, 1) \quad (9)$$

$$\dot{I}_{i,k} = \frac{\dot{U}_{i,(k+1)} - \dot{U}_{i,(k+2)}}{Z} + Y \cdot \dot{U}_{i,(k+1)} \quad (k = i+1, i+2, \dots, N-1) \quad (10)$$

若各单元线段上均有同频率的感应电压源作用,则各节点的线间的电压和电流为每个单元线段感应电压源单独作用时响应的叠加,即

$$\begin{cases} \dot{U}_k = \sum_{i=1}^N \dot{U}_{i,k} \\ \dot{I}_k = \sum_{i=1}^N \dot{I}_{i,k} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N \quad k = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

由以上分析结果可见:

- 4.1 式(2)~(11)均便于应用计算机迭代计算;
- 4.2 减小传输线两端阻抗,可降低传输线响应电压值;
- 4.3 可根据对计算结果准确度的要求,采用合适的分段数*N*;
- 4.4 便于处理牵引变电所内二次电缆各段所处的电磁环境不同使感应电源不同的情况;

同样方法计算分布感应电流源的传输线响应电压和电流,然后将同频率感应电压源和电流源的响应叠加。电缆外皮对地电压为传输线线间电压的一半;而其电流即为传输线电流。

5 垂直(沿*y*)方向电缆的电路模型与响应计算方法

5.1 计算响应的电路模型

沿*y*轴方向传播的干扰电磁场对垂直电缆的影响,根据干扰电磁场的分布,用文献^[7]中的方法计算单位长度外皮上的感应电压、电流;也可采用平行于*y*轴的分布源传输线模型,同样采用链形等效网络计算分布源作用下响应电压、电流。

与平行于*x*轴的分布源传输线模型比较,不同之处是,由于各单位长度离地面或其它导体平面位置不同,使其等效阻抗 Z_i 与容纳 Y_i 也各不相同。

5.2 响应的数值计算方法

同样应用等效阻抗简化电路模型和叠加原理,计算垂直传输线响应电压、电流。

与垂直传输线相连的水平传输线的总响应则是水平与垂直两部分同频率响应的叠加;将各次频域响应转换为时域响应后再叠加;得所有谐波分量干扰源作用下的时域解。

6 结论

6.1 随着远动技术在电力牵引供电系统中应用与推广,牵引变电所内电磁干扰与电磁兼容的研究已刻不容缓。本文为分析计算二次电缆共模干扰提供的数值方法,由于结合了电力牵引变电所电磁环境的特点,并且由铁路股道、供电方式及环境等综合因素的屏蔽影响已在计算分布感应电源时有所考虑^[7],因此该算法有具体针对性,但也不失一般性。

6.2 电力牵引变电所内电磁环境复杂、干扰频带宽,模型中分布源是傅立叶级数的某次谐波分量,计算中所取谐波次数高、传输线分段数越多,则计算结果准确度就越高。

6.3 采取减小电缆金属护套两端接地电阻措施,可降低外皮对地电压;电缆外皮上有电流流动,就会通过转移阻抗耦合至电缆芯线上感应干扰电压,传至终端设备。电缆外皮电流是信号传输段的主要干扰源,因此,对信号传输电磁干扰的控制主要是控制二次电缆的外皮电流。可采取适当的分布接地与损耗滤波的办法来控制电缆外皮电流的影响。

[参考文献]

- [1] 马信山等. 电磁场基础. 北京:清华大学出版社,1995. 275~288.
- [2] 江辑光. 电路原理. 北京:清华大学出版社,1997. 237~295.
- [3] 赖祖武. 电磁场干扰防护与电磁兼容. 北京:原子能出版社,1993. 248~262.
- [4] 吴渊明. 铁路总体设计. 北京:中国铁道出版社,1986. 374~380.

(下转第30页)

证采样频率不再变化)。当: $|U_{MR} - U_{NR}| = 0$ 且 $|U_{MX} - U_{NX}| = 0$ 时,再次读取时钟 t_2 并记录,同时启动一定时(定时的时间可采用自适应方法控制)。当定时时间到,而在定时过程中上述两式基本上保持不变,则可算得: $t = t_2 - t_1$,经与整定的 t_{dq} 对比后,可确定实测的固定导前时间 t_{dq1} 。

6 简要的程序框图(见图3)

7 结论

本文简要地对比了巴特利特窗付氏算法与全波付氏算法在测频时的不同特点。得出了巴特利特窗付氏算法优于全波付氏算法的结论。为使频率测量尽可能少受角度计算误差的影响,本文建议采用线性插值法求反正切函数,不仅可保证角度计算有足够高的精度而且大大地减少了计算量。为保证准同期并列时,合闸时刻的频差不大于整定频差,本文在准同期并列的条件中增加了一条即:

$$|d \angle d t| < (2 |f_M - f_N| z - 2 |f_M - f_N|_{HL}) \times$$

t_{dq} 。另外,为尽可能准确地检测并列条件,本文还考虑了一些相关的问题。最后,本文简要地给出了准同期并列的软件流程图。以上所述算法已经在80196KC实现的线路保护中作为附属功能得到过使用,效果良好。

[参考文献]

- [1] 苏沛浦等. 论用于输电线路故障测距的数字滤波器的设计. 华北电力学院学报, 1985.
- [2] 吴必信等. 用于故障测距装置中的数字滤波算法. 电力自动化设备, 1995.
- [3] Phadke A G, Thorp J S, Adamiak M G A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of Change of Frequency. IEEE Trans, 1983, PAS- 102(5): 1025 ~ 1038.
- [4] 李振然. 利用富里叶变换实现微机自动准同期. 继电器, 1994.

收稿日期: 1999—03—19

作者简介: 沈鲁豫(1965-), 男, 硕士, 讲师, 从事电力系统继电保护及变电站综合自动化研究工作; 陈冬菊(1966-), 女, 硕士, 讲师, 从事电力系统自动化技术研究工作。

THE APPLICATION OF MEASURING FREQUENCY TECHNIQUE BASED ON SOFTWARE IN AUTOMATIC SYNCHRONIZE CLOSING APPARATUS

SHEN Lu-yu¹, CHEN Dong-ju¹, WANG Wen-jiang²

(1. Nanjing Electric Power College, Nanjing 210013, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000)

Abstract The differences of "Batalit's windows Fourier-transform" and "The full wave Fourier-transform" algorithm in frequency measurement is compared and analyzed in this paper. In order to decrease real-time calculation and assure accuracy, the linear-interpolation algorithm is used in the angular-degree measurement. At last, others relative problem is considered and a simply program flowchart diagram is given.

Key words automatic synchronize closing; frequency measurement by software; harmonic

(上接第26页)

- [5] 钱清泉. 电气化铁道运动技术. 北京: 中国铁道出版社, 1994. 213 ~ 222.
- [6] 林福昌等. 屏蔽电缆感应干扰的数值计算方法. 高电压技术, 1997, 23(4).
- [7] 杨焯成. 牵引变电所内一次系统和二次系统的电磁兼容. 继电器, 1999, (1).

- [8] 高攸刚译. 电磁场对屏蔽电缆的影响. 北京: 人民邮电出版社, 1998. 31 ~ 46.

收稿日期: 1998—12—29

作者简介: 杨焯成(1943-), 女, 副教授, 从事电力电子理论教学及科研工作。

A NUMERICAL ALGORITHM ABOUT THE SECOND CABLE COMMON MODE DISTURBANCE OF ELECTRIC TRACTION SUBSTATION

YANG Ye-chen

(East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China)

Abstract A numerical algorithm about the second cable common mode disturbance of electric traction substation and some steps to reduce and control common mode disturbance are put forward in this paper, according to the basic electromagnetism circumstances characters of electric traction substation, by using transfer line theory, dispersed source transfer line mode, and chain equivalent network and equivalent impedance simple circuit mode.

Key words electric traction substation; shielded cable; common mode disturbance; numerical algorithm