

电缆泄漏电流在线监测相关理论与仿真研究

常宇健, 李加驹

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:以某牵引变电所长度为 100 m 左右的埋地电缆为研究对象,对电缆故障泄漏电流检测法进行理论分析与建模仿真研究,泄漏电流通过电缆首尾端电流的差值获得。研究表明,泄漏电流会随着电缆绝缘材料劣化的加剧而出现增大的趋势,根据该变化趋势可以作为电缆发生老化故障的判断依据。劣化过程中电缆首尾端电流的相位差也会出现增大的趋势;对该相位差进行校正以计算出正确的泄漏电流值,对于保证该检测方法的有效性具有重要意义。

关键词:电缆绝缘故障;在线监测;泄漏电流法;理论建模;ATP 仿真

中图分类号:TM93 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2017)01-0099-05

0 引言

目前电缆故障检测的传统方法主要有局部放电检测法、直流成分法、直流(交流)叠加法、在线法和接地线电流法等。这些方法的实现,基本上都需要在接地线电流当中提取故障特征信号。其中局部放电法提取放电信号^[1-2],直流成分法提取直流成分^[3-4],在线 $\tan\delta$ 法和接地线电流法分别通过电缆 $\tan\delta$ 值与接地线电流值随着时间的变化趋势来判断^[5-6]。经过多年的发展,电缆故障检测技术已由单一的电信号提取、判别转化为电-光-声-热信号综合提取、分析、判别的模式,而且还引入了很多外围技术,以增强检测系统整体性能。这一转变,使得故障检测精度达到了前所未有的高度。例如,美国学者提出了一种通过运用声放电传感器来检测介电材料局部放电产生的声音信号来达成埋地电缆的故障在线检测;日本学者提出将 GPS 定位系统运用到电缆故障检测上来,该技术可以对地下和海底电缆进行故障检测。但是目前的检测技术对故障信号提取技术有着很高的要求,而且由于铁路牵引供电系统存在大量的机车谐波干扰,其中交-直-交型机车的谐波成分主要为 21、23、25、27、45、47、49、51 次谐波^[7],机车谐波注入使得接地线电流当中含有很多干扰信号,这样在提取有用信号时存在困难。

基于此,本文提出通过实时监测电缆首尾端电流,通过二者差值来计算出电缆总泄漏电流的方法来进行故障检测,这样检测得到的泄漏电流值包含了电缆绝缘的整体故障信息,不管是整体老化故障和局部破损故障都可以通过泄漏电流的变化趋势反映出来。

1 电缆泄漏电流相关理论研究

电缆泄漏电流检测示意图如图 1 所示,电缆绝缘层可以等效为电阻与电容的并联电路,在电缆通电运行的过程当中,会有电流流经电缆的主绝缘层,该电流即为电缆的泄漏电流 I_d ,其中 I_d 的大部分电流以电缆的金属护层为通道流向大地,另一部分直接透过破损点流向大地。伴随着电缆“水数枝”的发展,主绝缘会表现出等效电阻逐渐减小,等效电容逐渐增大的趋势,使得

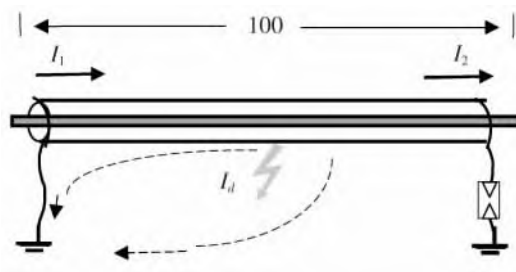


图1 电缆泄漏电流检测示意图(单位:m)

收稿日期:2016-01-12 责任编辑:刘宪福 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2017.01.19

作者简介:常宇健(1973-),女,副教授,研究方向为接触网故障检测。E-mail:1058616921@qq.com

常宇健,李加驹. 电缆泄漏电流在线监测相关理论与仿真研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2017,30(1):99-103.

I_d 也会随之增大,而且绝缘劣化越严重 I_d 增长越明显。因此可以通过 I_d 的整体变化趋势来作为电缆绝缘发生老化的依据,这可以通过数学建模、理论式推导与仿真试验来验证。

对输电线路进行建模,必须考虑采用分布参数模型还是集中参数模型。由于本文研究泄漏电流信号的频率成分主要为 50 Hz 信号,由波的传播理论可以得知,其波长约为 6 000 km,远比电缆线路本身长度要长,所以可以采用集中参数电路来作为电缆的等值模型^[8]。

电缆 T 型集中参数等效电路如图 2 所示,其中 I_1, I_2, U_1, U_2 分别为电缆首端和尾端的电流、电压, Z 为线芯等效阻抗; G 和 C 分别为绝缘等效电导与电容, I_d 为流经主绝缘的总泄漏电流。由 KCL 定律可以计算出泄漏电流 I_d 为

$$I_d = (G + j\omega C)U = \frac{(U_1 + U_2)(G + j\omega C)}{(RG - \omega^2 LC + 2) + j(\omega CR + \omega LG)} \quad (1)$$

可以看出,电缆泄漏电流是关于 R, L, G, C 和 ω 的复杂方程。由于电缆线芯材料采用铜质导线绞和紧压而成,而铜的电阻率较小,对于短距离输电满足 $R \ll L$ 的条件,而且电缆绝缘材料在劣化过程当中满足 $G \ll C$ 的条件,基于此为了便于理论推导,可以按照该条件将式(1)进行化简

$$I_d = \frac{(U_1 + U_2)j\omega C}{(2 - \omega^2 LC)} \quad (2)$$

可以看出,在电缆首末端电压和频率一定的情况下(对于确定的电缆,其 L 一般为定值), I_d 的幅值会随着电容的增大而出现增大的趋势,表明电缆泄漏电流会随着绝缘材料的劣化而增大。但是在劣化的过程中绝缘材料内部会长出“水树枝”,在交流电压的作用下水树枝与地之间有类似于针-板整流的作用,“整流”作用和机车谐波的干扰使得 I_d 中含有很多高频成分,很显然在相同的条件下高频成分的幅值增长趋势要高于低频成分的增长趋势,因此高频成分的存在会使得泄漏电流检测法的灵敏度降低,甚至可能造成误判的情况;同时由于无法准确获知 I_d 当中所包含的所有频率成分,所以在实际的检测过程当中一般根据 50 Hz 频率成分随着时间的增长趋势来进行判断,所以对于数据滤波处理极其重要。

同理,由集中参分布电路和 KCL 定律还可以计算出电缆首尾端的电流 I_1 和 I_2 ,并根据条件 $R \ll L$ 和 $G \ll C$ 略去无穷小项后可得简化表达式

$$I_1 = \frac{U_1 - U}{Z} \approx \frac{(1 - \omega^2 LC)U_1 - U_2}{j(2\omega L - \omega^3 L^2 C)} \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{U - U_2}{Z} \approx \frac{U_1 - U_2(1 - \omega^2 LC)}{j(2\omega L - \omega^3 L^2 C)} \quad (4)$$

通过式(3),式(4)可以画出 U_1, U_2, I_1, I_2, I_d 之间的向量关系图,如图 3 所示,由该向量图可以准确获知在电缆绝缘材料劣化的过程当中,各个量之间的相位、幅值的变化关系。

由图 3 可以看出,假设在绝缘老化过程当中的某一瞬间,电缆首尾端的电压保持相位与幅值不变,则电容 C 的增大使得首尾端电流向量分别呈顺时针和逆时针方向转动,即二者的相位差会随着绝缘老化而逐渐增大,电缆老化越严重相位差越大。因此实际检测过程当中必须对首尾端电流进行相位校正,才能计算出正确的泄漏电流值。

2 建模与仿真分析

本文以型号为 YJY73-27.5 kV $1 \times 185 \text{ mm}^2$ 电缆为研究对象,用 ATP/EMTP 仿真软件对电缆进行建模仿真分析。由电缆的型号可以查得其结构尺寸,再根据电缆结构尺寸参数,可以定量计算得电缆的线芯电阻、电感与绝缘等效电阻、电容^[10]。

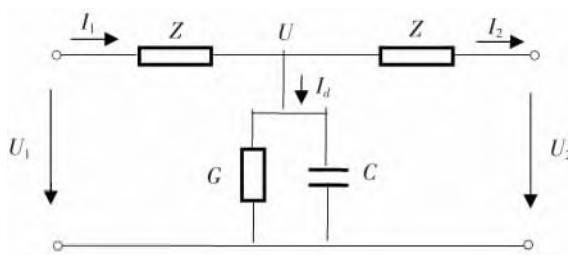


图 2 电缆集中参数等效电路

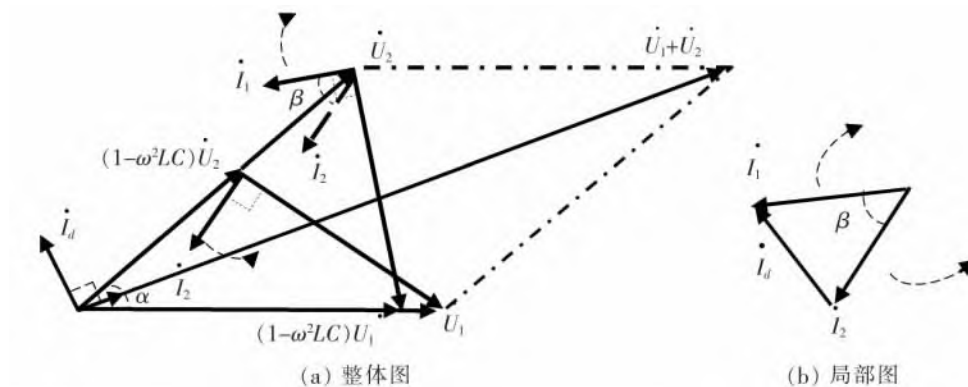


图 3 向量关系图

计算结果分别为 $9.45 \times 10^{-3} \Omega$, 0.0342 mH , $1.725 \times 10^{15} \sim 10^{16} \Omega$, 0.0139 uf (长度为 100 m 的等效参数)。由此可以建立电缆集中参数仿真电路如图 4 所示。其中, Z 为线芯等效阻抗; R 和 C 分别为绝缘等效电阻与电容; a 端为电缆护层直接接地端, 通过一小电阻来代表接地电阻; b 端为护层经保护器接地端, 通过一压控开关模拟保护器。

由以上仿真模型, 将仿真初始电阻设为 $R_0 = 1.725 \times 10^{15} \Omega$, 初始电容设为 $C_0 = 0.0139 \text{ uf}$, 为了便于研究, 先设电阻比率与电容比率分别为

$$K_r = \log(R_0/R_i) \quad (5)$$

$$K_c = C_i/C_0 \quad (6)$$

式中, R_i 与 C_i 分别表示仿真过程中所取的实际电容与电阻值, 并且 R_i 的值从 R_0 开始逐渐减小, C_i 的值从 C_0 开始逐渐增大, 取多组 R_i 和 C_i 进行仿真, 模拟电缆绝缘老化过程当中泄漏电流的变化趋势, 如图 5 所示。

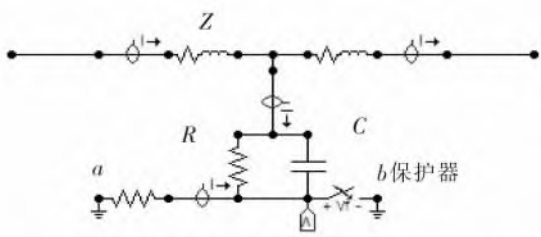
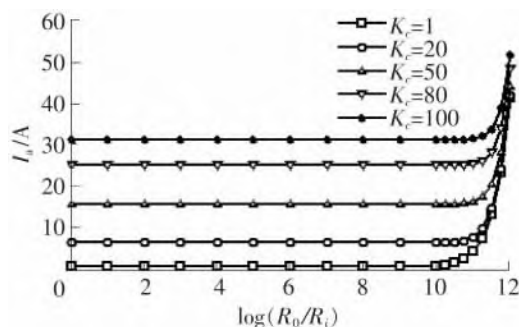


图 4 集中参数仿真电路

图 5 I_d 与 K_r 和 K_c 的取值关系图

从图 5 可以看出, K_r 和 K_c 取值的增长都能使得 I_d 出现增长的趋势, 在绝缘劣化的早期 I_d 增长比较平缓, 在劣化的后期 I_d 会出现突然增大的情况。由此可以得出, 在电缆投入运行之后的很长一段时间以内, 其泄漏电流很小, 增长的速度缓慢, 表明电缆绝缘良好, 可以继续使用。但是在绝缘劣化的后期, 泄漏电流会出现突然增大的现象, 表明绝缘材料严重劣化, 必须切除或更换。

表 1 为 I_1 与 I_2 之间的相位差与 K_c 的取值关系数据表。表 1 中“ I_1 过零点”与“ I_2 过零点”分别表示在整个仿真时段内, 首端电流与尾端电流数据序列首次过零点的坐标, 通过两数据序列首次过零点坐标的差值可以反映出首尾端电流的相位差。表格的第 4 行表示二者之间的实际相位差弧度, 由于 ATP 默认采样时间间隔为 $1 \mu\text{s}$, 对于工频信号, 一个周波采样点数为 20000 点, 则一个采样点对应的相位差为 $\pi/10000 \text{ rad}$, 由此可以计算出不同 K_c 取值下电缆首尾端电流的实际相位差弧度。

表 1 相位差与 K_c 的取值关系

K_c	I_1 过零点	I_2 过零点	相位差/rad	K_c	I_1 过零点	I_2 过零点	相位差/rad
10	4 986	5 007	0.006 59	60	4 917	5 042	0.039 25
20	4 972	5 014	0.013 19	70	4 903	5 049	0.045 84
30	4 958	5 021	0.019 78	80	4 889	5 056	0.052 44
40	4 944	5 028	0.026 38	90	4 875	5 063	0.059 03
50	4 931	5 035	0.032 66	100	4 861	5 070	0.065 63

从表 1 可以看出,随着 K_c 取值的增大 I_1 首次过零点的坐标不断减小,表明随着劣化的进行 I_1 的相位变得越来越超前,而 I_2 的变化正好相反,使得二者之间的相位差越来越大。这与以上理论研究章节当中关于 I_1 与 I_2 的相位分析结论一致,即 I_1 随着电缆绝缘电容量的增加而顺时针摆动, I_2 向量逆时针摆动,使得二者的相位差变大。

图 6 为某牵引变电所同相 3 根并联电缆各自泄漏电流趋势图。从图 6 中可以看出,正常情况下电缆的泄漏电流值很小,整体幅值在合理的范围内波动,表明电缆绝缘良好,电缆可以继续使用。这与仿真得出的结论一致,而且与文献[11]中的测试结论也一致。

3 结论

通过以上对电缆进行数学建模、理论推导与仿真验证的研究可以得出一些结论,而且可以对该方法的运用前景进行展望:

(1)在电缆投入运行之后,绝缘材料劣化

会导致电缆泄漏电流逐渐增大,因此根据泄漏电流随着时间的变化趋势可以间接的反映出电缆绝缘当前状况;但是劣化的过程会导致电缆首尾端电流的相位差逐渐增大,所以实际检测时必须对二者的相位差进行校正,以计算出正确的泄漏电流值,以保证检测方法的准确性。

(2)该检测方法可以说是对“接地线电流检测法”的改进,二者本质上都是检测电缆的泄漏电流,只不过通过接地线测量泄漏电流需要针对电缆护层不同的接地方式来抑制护层环流的干扰。而本文采用的方法采用计算的方法获得泄漏电流,因此适用范围较广,不用考虑电缆的接地方式。

(3)对于长距离输电电缆的故障检测,可以在各个电缆中间接头处分别安装电流传感器,根据相邻的两个传感器信号的差值信号实现对电缆的分段检测,这样有利于对故障位置进行定位。

该方法其他检测方法相比而言实现起来比较容易,无论是整体老化故障还是局部破损故障,都可以通过电缆首尾端差值反映出来,具有一定的实际意义。但是和其他检测方法比较起来,该方法的实现需要多引入一个电流传感器,而且由于是直接对线芯电流进行采集,所以需要具备很高的安保措施。

参 考 文 献

- [1]孙波,黄成军. 电力电缆局部放电检测技术的探讨[J]. 电线电缆,2009(3):38-41.
- [2]陈延兵. 10 kV 临电线路线损原因及降损措施[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(s1):291-293.
- [3]马燕宁. 全并联 AT 双边供电方式的故障测距方法[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(3):79-83.
- [4]郭大江,陈泉林. 基于接地线电流法的多线路电缆绝缘在线监测系统的设计[J]. 仪表技术,2009,7:33-38.
- [5]范伟亮. 高速铁路隧道水沟电缆槽施工技术[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(s1):117-120.
- [6]王硕禾,许继勇,许惠敏,等. 基于 LabView 的牵引供电电能质量检测与分析装置研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2011,24(2):94-110.

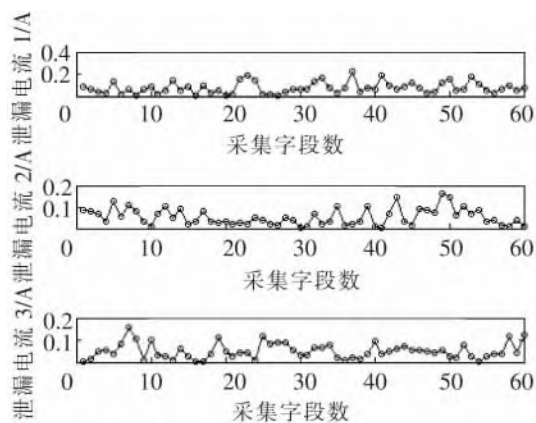


图 6 泄漏电流趋势图

- [7]王硕禾. 基于模态分析的牵引供电系统谐波谐振过电压研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(7): 32-41.
- [8]邱关源, 罗先觉. 电路[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9]王洪新, 程树康, 文习山, 等. XLPE 老化过程中交流绝缘参数特性[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 7-10.
- [10]杨柳. 高速铁路馈线电缆接地方案与故障监测[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [11]张海龙. 110~220 kV XLPE 电缆绝缘在线检测技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.

Theoretical Study and Simulation Verification About Online Monitoring of Cable Leakage Current

Chang Yujian, Li Jiajv

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the contact network of about 100 meters of buried cable in a traction substation, studying on the cable fault leakage current detection method both theoretically and in the way of simulation, the leakage current can be obtained by subtracting the current head and tail ends of each cable. Simulation study shows that, the leakage current will increase with the deterioration of the cable insulation material; and the trend of the change can be used as the basis for judging whether the insulation of the cable is aging or not; and in the deterioration process, the phase difference of current cable head and tail end will has a tendency of increase. Therefore, the phase difference is corrected to calculate the correct leakage current value, which has important significance to guarantee the validity of this method.

Key words: cable insulation failure; online monitoring; leakage current; theoretical modeling; ATP simulation

~~~~~  
(上接第 90 页)

## Construction of Virtual Experiment Platform for Electric Power Steering System

Liu Chaoying<sup>1</sup>, Zhang Lu<sup>2</sup>, Wu Wenjiang<sup>3</sup>, Wang Zhanzhong<sup>2</sup>

(1. Hebei Medical University, Shijiazhuang 050000, China;

2. College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

3. Engineering Training Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Steering test bench is studied in this paper, and a three-dimensional model test bench is established by UG software. The three-dimensional model is introduced into ADAMS software, and electric power steering system of multi-body dynamics model is established. Booster motor model is established by SIMULINK software, linear assist characteristic curve is selected as the electric power steering system booster characteristic curve, the electric power steering system PID control system is set up, and PID parameters are tuned. Co-simulation of electric power steering system has been carried out, and the results meet the relevant requirements. The co-simulation results show that the electric power steering system virtual experiment platform has been built successfully.

**Key words:** electric power steering system; co-simulation; virtual experiment platform