

DOI: 10.7652/xjtuxb201908019

中压直流供电系统远端站点接地状态 扫频阻抗检测法

刘小军, 祝令瑜, 汲胜昌, 潘亮, 任富强

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决中压直流供电系统中远端站点设备外壳接地状态远距离检测问题,提出了一种基于扫频阻抗的远端站点接地状态检测方法。首先建立了中压直流供电系统的中心站点、传输线路及远端站点模型,并将远端站点接地状态分为正常接地、远端接地断开以及远端与电缆接地均断开 3 种状态。通过理论分析,在中心站点并联一个高频交流源支路,检测高频交流源输出端对地阻抗,可以判断远端站点接地状态。基于 PSpice 及 PSCAD 的仿真研究发现,利用扫频方法得到网络正常接地状态时的谐振频率,并设置交流源频率为该频率,可提高对地阻抗检测方法的区分度。根据得到的电流扫频曲线,发现不同接地状态时电流扫频曲线中平均谐振频率会发生改变,平均谐振频率与线路传输距离长度有关。对 150、500 及 1 000 m 长度的单条线路,300 m & 800 m、500 m & 1 000 m 长度的双传输线路远端站点接地状态进行检测,仿真验证了扫频阻抗检测方法的可行性。最后,提出了针对中压直流供电系统中远端站点接地状态的检测算法流程图。

关键词: 中压直流供电系统;远端接地;扫频阻抗;状态检测

中图分类号: TM764.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)08-0141-10

Frequency Sweep Impedance Detection Method for Remote Site Earthing Fault in Medium Voltage DC System

LIU Xiaojun, ZHU Lingyu, JI Shengchang, PAN Liang, REN Fuqiang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve the remote detection problem of earthing state of remote site equipment shell in medium voltage DC system, a remote site earthing fault detection method is proposed based on frequency sweep impedance. A three-unit model of center site, transmission line and remote site of the system is established, and the earthing fault in remote site is divided into three states: normal grounding, disconnection of remote grounding, and disconnection of both remote and cable grounding. After theoretical analysis, a high-frequency AC source is connected in parallel at the center site to detect the impedance to ground, and earthing fault in remote site can be judged. Following the simulation result from PSpice and PSCAD, the frequency of the AC source is set as the resonant frequency when the system is in the normal grounding state to improve the accuracy of this method. The current sweeping curve indicates that the average resonant frequency changes in different grounding states. A system with single line of 150 m, 500 m and 1 000 m and a system with parallel lines of 300 m and 800 m, 500 m and 1 000 m are tested to verify the

收稿日期: 2019-02-25。 作者简介: 刘小军(1993—),男,硕士生;祝令瑜(通信作者),男,副教授。 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2015M572561)。

网络出版时间: 2019-05-05 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190429.1716.006.html>

feasibility of this method, and the flow chart of the detection algorithm is presented.

Keywords: medium voltage DC system; remote earthing; frequency sweep impedance; state detection

直流供电系统体现出很大的便利性以及低成本优势,在工程各个领域中都得到了大量的应用^[1]。随着直流供电系统的日益庞大及供电电压的不断提高,带来一些潜在的危险:随着电压等级的提高,旧有的直接操作习惯会使原先安全隐患的危险级别提升,易对人员造成的伤害^[2-3]。根据具体实现的功能,可以将中压直流供电系统分为中心站点、传输线路及远端站点。在中压直流供电系统远端站点内,所有的通讯设备的金属外壳均应经由线缆接地,但实际上常常会因接线不规范等原因导致外壳接地断开,致使远端站点内通讯设备外壳带电^[4],给操作人员的人身安全造成威胁,因此需要对远端站点内设备及机壳的接地状态进行检测^[5-7]。

针对远端站点内设备接地断开故障,文献[8]通过检测接近开关的导通状态,判断挂接地线时接地夹钳与接地体是否有效导通。文献[9]依靠挂接地线人员通过手持 PDA 扫描条形码标牌来告知调度接地线状态,但依靠人工巡检的成本较高,且设备接地点处出现断线故障时仅凭借人工难以识别。文献[10]向变电站接地网内施加激励信号,通过测量地表磁场分布,对变电站接地断点进行诊断和定位,但该方法仅适用于交流系统,无法同样适用于直流系统。文献[11]通过测量地面表面电压的方式检测接地网中断点。在中压直流供电系统中,一种易行的检测方法是在远端站点内安装检测装置,但是会干扰站点内设备的正常工作,因而具有极大的局限性。

本文提出了一种基于扫频阻抗的中压直流供电系统远端站点接地状态检测方法,并利用该方法分别在单线路及多线路中压直流供电系统中远端站点接地状态进行仿真验证,具有一定的工程实用价值。

1 检测方法的提出

频率响应法是向系统中注入扫频电压信号,随着频率的改变,系统中输出信号与输入信号的比值也会发生变化,以此判断系统运行状态。

阻抗测量法需要测量在特定频率下的系统阻抗值,当系统运行状态发生改变时,阻抗值也会发生变化,通过测量阻抗变化量,可以判断系统运行状态。

扫频阻抗法将频率响应法与特定频率下的阻抗测量法相结合,可以准确检测系统中阻抗的变化,进

而判断系统运行状态。不同系统运行状况下,系统电路拓扑中的电容、电感、电阻及电导会发生改变,电路拓扑对应的谐振频率也会发生改变。向系统中注入扫频电压信号,电压信号在系统中产生的电流幅值随频率变化曲线发生改变。不同系统运行状况对应的阻抗变化与注入信号频率有关。选择系统谐振频率为特定频率测量系统阻抗,可以增加阻抗变化的分辨率,有助于提取基于阻抗变化的系统运行状况判据。

在中压直流供电系统中,在中心站点注入扫频电压信号,获得不同系统运行状况下扫频源输出端电流扫频曲线及系统谐振频率。比较不同系统运行状况下电流扫频曲线的变化,提取特定谐振频率。计算在该特定谐振频率下,注入信号源输出端对地阻抗值,基于对地阻抗值的变化对系统运行状况进行判断。注入扫频信号幅值较低,仅为 1~2 V,远低于中压直流供电系统的运行电压,经过变压输入到系统设备后,在设备正常工作电压范围内,不会影响设备正常工作,不会对系统正常工作造成干扰,简单易行,理论上可以用于实时检测设备运行状况。

2 中压直流供电系统模型的建立

根据具体实现功能,中压直流供电系统主要由中心站点、传输线路以及远端站点组成,如图 1 所示。其中,中心站点包括直流电源、检测装置以及控制系统;传输线路用于将中心站点电能传输到远端站点,为远端站点供电;远端站点内布置有用电设备。

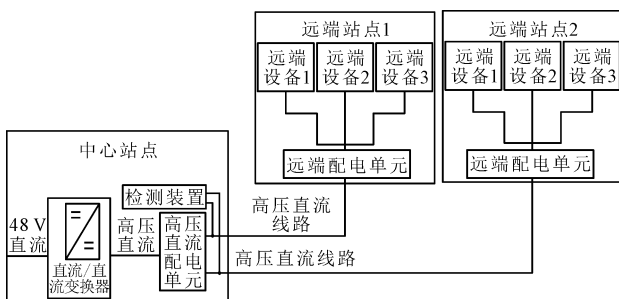


图 1 中压直流供电系统拓扑结构

为简化研究,对中压直流供电系统拓扑结构等效变换,建立等效电路模型,如图 2 所示。考虑到中心站点内高压直流配电单元一般为变压器或整流器,由远端站点内产生的故障信号与高压直流隔开。

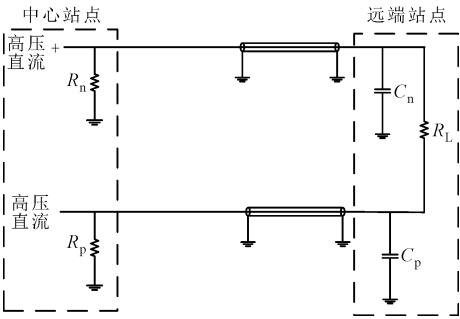


图 2 中压直流供电系统等效电路模型

因此,可以用两组分别产生相同电压幅值、极性相反的三相半波整流电路,等效中心站点内的直流电压源,搭建中压直流供电系统仿真模型,如图 3 所示。图中 C_f 为滤波电容,值为 $4\,700\,\mu\text{F}$,滤除半波整流产生的较大幅值的纹波,保证线路中直流的低纹波; R_n 与 R_p 为钳位电阻,同时作为首端线对地绝缘电阻,等效阻值为 $2\,\text{M}\Omega$,电阻一端与直流正极性线路及直流负极性线路连接,另一端接地,以保证直流正极性线路及直流负极线线路上电压保持平衡; C_n 与 C_p 为远端站点内设备对地等效电容,分别为设备输入端正、负极对地杂散电容,容值较小,本文取 $6\,\text{nF}$,分别连接于直流正、负极性线路与大地之间; R_L 为远端站点内设备的等效阻抗,取为 $5\,\Omega$ 。

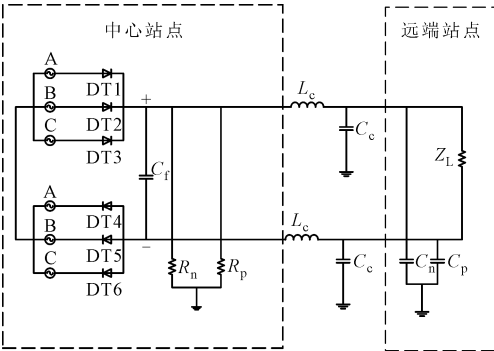


图 3 中压直流供电系统仿真模型

传输电缆线路可以利用电缆分布参数来等效替代,中压直流供电系统中电缆线路长度一般为 $0.01\sim 1\,\text{km}$ 。在较高频率下,电缆的阻抗主要由分布电感与对地电容决定,电缆电导与电阻可以忽略不计^[11-13]。考虑工程实际,直流传输电缆一般为双芯电缆或三芯电缆,其中双芯分别作为正、负极性传输线路,另外一根芯线或屏蔽层作为接地。假定电缆为均匀传输线^[14-16],则可以根据电磁场理论推导得到双芯电缆的对地电容 C 及分布电感 L 的近似表达式为

$$C = \frac{0.024\,13\epsilon}{\lg(D/d)} \quad (1)$$

$$L = 0.2\ln \frac{2S}{d} + 0.05 \quad (2)$$

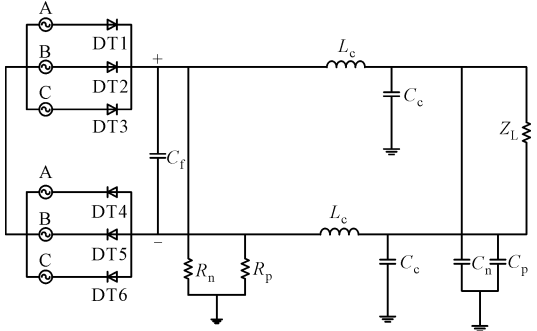
式中: S 为双芯电缆导体间的中心距离,mm; d 为双芯电缆导体外径,mm; D 为双芯电缆导体的绝缘外径,mm; ϵ 为绝缘材料相对介电常数。

本文选用型号为 UL2464 $2 \times 8\text{AWG}$ 的屏蔽控制电缆,计算可得 $C = 1.185 \times 10^{-7}\,\text{F/km}$, $L = 2.786 \times 10^{-4}\,\text{H/km}$ 。实际测量 $1\,\text{km}$ 双芯电缆的对地电容为 $0.12\,\mu\text{F}$,理论计算值与实际值能够吻合。

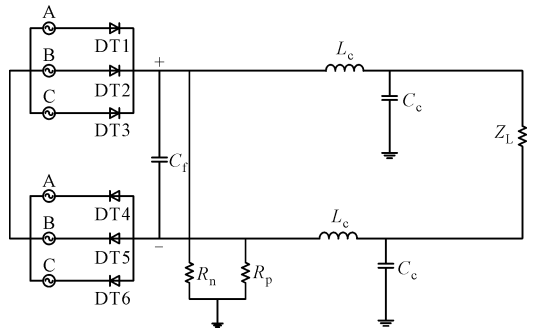
3 高频阻抗检测法

在中压直流供电系统中,远端站点内设备外壳通过接地电缆接地,传输电缆的接地芯线或屏蔽层单独接地。远端接地状态可以分为正常接地状态、远端接地断开状态、远端接地与电缆接地均断开状态。正常接地状态即远端站点内设备和传输电缆正常接地;远端接地断开状态即只有远端站点内设备接地断开,传输电缆屏蔽层正常接地;远端接地与电缆接地均断开状态即远端站点内设备接地与电缆屏蔽层的接地均断开。中压直流供电系统远端站点不同接地状态电路拓扑如图 4 所示。

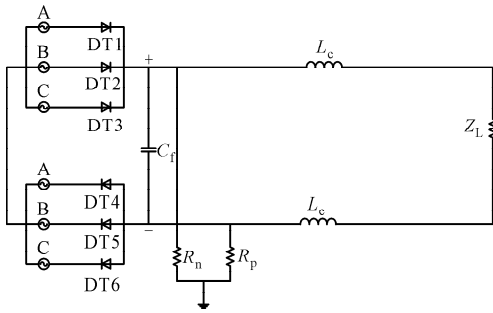
中压直流供电系统远端站点接地状态处于不同状态时,电路拓扑结构发生较大变化,其中对地回路中的元件参数变化尤其明显。在高压直流正极性线



(a) 正常接地状态



(b) 远端接地断开状态



(c) 远端与电缆接地均断开状态

图4 不同接地状态电路拓扑

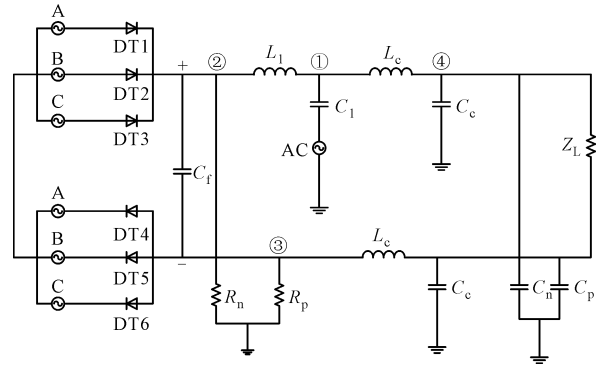


图5 阻抗检测电路图

路靠中心站点侧与地之间并联一个高频交流源支路,可以通过检测高频交流源输出侧对地阻抗的变化来检测远端站点的接地状态,如图5所示。其中,在高频交流源输出端串联隔直电容 C_1 ,防止高压直流流入高频交流源;在直流源与高频交流支路间串联隔交电感 L_1 ,防止高频交流流入直流源。通过测量高频回路中高频交流源输出端对地阻抗及其相位,可以对远端接地状态进行判断。

在远端站点不同接地状态时的高频回路拓扑中,可以列写求解高频回路对地阻抗的节点电压方程如下

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{U}_n = \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_1 (\dot{\mathbf{U}} - \dot{\mathbf{U}}_{n1}) \quad (4)$$

$$\mathbf{Z} = \dot{\mathbf{U}} / \dot{\mathbf{I}} \quad (5)$$

式中: $\dot{\mathbf{U}}$ 为高频交流源电压; ω 为电压源角频率; $\dot{\mathbf{I}}$ 为高频回路电流; $\mathbf{Z}$ 为高频回路对地阻抗; 节点电压

$$\mathbf{U}_n = [U_{n1} \ U_{n2} \ U_{n3} \ U_{n4} \ U_{n5}]^T$$

$U_{n1} \sim U_{n5}$ 为图5中①~⑤处节点电压; $\mathbf{B}$ 计算式为

$$\mathbf{B} = [\mathbf{j}\omega \mathbf{C}_1 \mathbf{U} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

正常接地状态、远端接地断开状态、远端接地与电缆接地均断开状态时,阻抗矩阵分别为 $\mathbf{A}_0$ 、 $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$, 表达式如下

$$\mathbf{A}_0 =$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_1 + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} & 0 & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & 0 \\ -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} & \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} + \frac{1}{R_n} & -\mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f & \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} + \frac{1}{R_p} & 0 & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} \\ -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & 0 & 0 & \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_c + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} + \frac{1}{Z_L} + \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_n & -\frac{1}{Z_L} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & -\frac{1}{Z_L} & \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_c + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} + \frac{1}{Z_L} + \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_p \end{bmatrix}$$

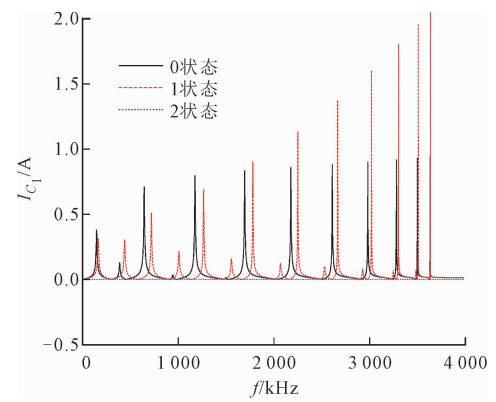
$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_1 + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} & 0 & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & 0 \\ -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} & \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_1} + \frac{1}{R_n} & -\mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f & \mathbf{j}\omega \mathbf{C}_f + \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} + \frac{1}{R_p} & 0 & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} \\ -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & 0 & 0 & \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} + \frac{1}{Z_L} & -\frac{1}{Z_L} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} & -\frac{1}{Z_L} & \frac{1}{\mathbf{j}\omega L_c} + \frac{1}{Z_L} \end{bmatrix}$$

态扫频曲线该点处谐振频率 f_0 为 663.7 kHz,远端接地断开状态扫频曲线该点处谐振频率 f_1 为 678.9 kHz,远端接地与电缆接地全部断开状态该点处无谐振。663.7 kHz 为正常接地状态高频回路发生谐振,电流幅值较大,此频率不是远端接地断开状态回路谐振频率。因而在 663.7 kHz 处,正常接地状态时电流幅值远高于远端接地断开状态时电流幅值。相比于选用 10 kHz 作为交流高频源频率,利用扫频谐振方法选择高频交流源频率可以增大远端接地断开状态与正常接地状态的区分度。

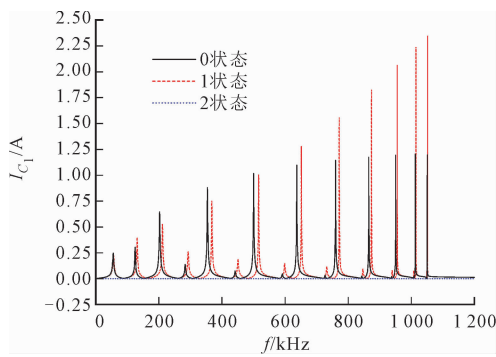
表 1 不同接地状态扫频曲线谐振频率

序号	f_0/kHz	f_1/kHz	$(f_1 - f_0)/\text{kHz}$
1	57.2	58.8	1.6
2	129.8	136.5	6.7
3	210.8	220.0	9.2
4	295.5	305.4	9.9
5	368.5	383.2	14.7
6	460.0	469.2	9.2
7	521.2	537.5	16.3
8	615.5	623.5	8.0
9	663.7	678.9	15.2
10	756.5	762.5	6.0
11	791.7	804.0	12.3
12	878.3	882.0	3.7
13	901.5	910.3	8.8
14	976.4	978.7	2.3
15	990.0	995.3	5.3
16	1 048.6	1 049.9	1.3
17	1 054.9	1 057.4	2.5
18	1 093.1	1 093.3	0.2
19	1 094.6	1 095.3	0.7

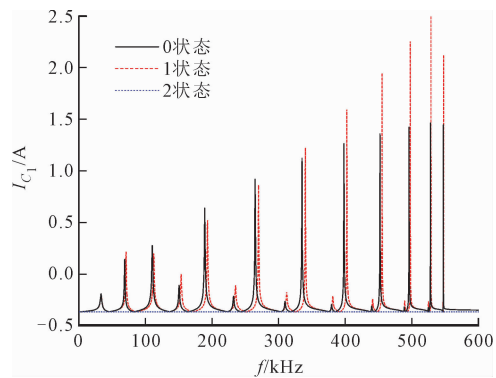
实际检测中,每一次检测都基于扫频曲线的方法较为复杂,对操作人员要求较高,且仅通过扫频曲线提出判据难度很大。在进行多线路接地状态检测时,仅通过扫频曲线的方式难以甄别多条线路中发生接地故障。将扫频曲线方法与高频阻抗法相结合,可以有效解决单条线路检测复杂度及多线路接地状态检测的问题。针对一固定线路,首先测得其扫频曲线,通过扫频曲线可以得到不同接地状态时电路拓扑的谐振点频率。综合考虑不同接地状态时同一谐振点频率差值与该点谐振电流幅值,选定高频交流电压源频率。在该频率下,正常接地状态时 Z 与远端及电缆接地均断开状态时的差别较大,区



(a) 150 m



(b) 500 m



(c) 1 000 m

图 7 不同长度电缆电流扫频曲线

分度较高,可以准确分辨出远端站点接地状态。

4.2 单条线路接地状态

在中压直流供电系统中,中心站点只与一个远端站点连接,利用扫频阻抗法对远端站点接地状态进行检测。基于 PSCAD,对单条线路中远端站点接地状态进行仿真,仿真电路如图 5 所示。

考虑传输电缆对地电容对远端接地状态检测准确度的影响,改变传输电缆长度,检测不同传输电缆长度下远端接地状态,结果如图 7 所示。扫频曲线中谐振峰频率与电缆分布电感、电缆对地杂散电容有关,电感与电容越小,谐振点频率越高。电感、电

容与电缆长度成正比,因而电缆长度越长,谐振点频率越低,设置扫频范围上限频率越低。其中,150 m 线路中分布电感为 $4.179\ \mu\text{H}$,对地电容为 $1.777\ 5\ \text{nF}$;500 m 线路中分布电感为 $13.93\ \mu\text{H}$,对地电容为 $5.925\ \text{nF}$;1 000 m 线路中分布电感为 $27.86\ \mu\text{H}$,对地电容为 $11.85\ \text{nF}$ 。

由图 7 可以看出,根据电流扫频曲线,可以初步判断远端的接地状态。当远端接地与电缆接地全部断开时,电流扫频曲线中电流幅值不随频率变化,且电流幅值接近于 0;远端接地断开状态与远端正常接地状态时电流扫频曲线中谐振点频率发生改变。计算得出:500 m 线路中正常接地状态时平均谐振频率 $\bar{f}_0$ 为 678.4 kHz,远端接地断开状态时平均谐振频率 $\bar{f}_1$ 为 685.4 kHz;150 m 线路中的 $\bar{f}_0$ 为 2.243 MHz, $\bar{f}_1$ 为 2.282 MHz;1 000 m 线路中的 $\bar{f}_0$ 为 340.78 kHz, $\bar{f}_1$ 为 342.70 kHz。以远端正常接地状态时电流扫频曲线中平均谐振频率值作为参考,比较谐振点平均频率,可以初步检测远端接地状态。

为了进一步对远端接地状态进行判定,综合考虑不同电流扫频曲线谐振频率差值与谐振电流幅值,分别选定 2.187 MHz、663.7 kHz 及 335.0 kHz 作为 150、500 及 1 000 m 线路的高频回路频率,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,当选定正常接地状态谐振频率作为高频回路中高频交流源频率时,远端不同接地状态时 Z 的区分度比 10 kHz 交流源频率时的阻抗区分度更大,可以通过扫频阻抗的方法对单条线路中远端接地状态进行检测。

表 2 不同长度传输电缆线路高频对地阻抗

线路 长度/m	Z_0/Ω	Z_1/Ω	$Z_2/\text{k}\Omega$
150	$0.78+\text{j}8.61$	$0.73+\text{j}28.10$	$1\times 10^3+\text{j}1.46$
500	$2.93+\text{j}2.69$	$7.29+\text{j}6.76$	$1\times 10^3+\text{j}1.46$
1 000	$0.83+\text{j}0.75$	$0.83-\text{j}21.09$	$1\times 10^3+\text{j}1.46$

4.3 多条线路接地状态

中压直流供电系统中心站点与多个远端站点连接,利用扫频阻抗法对远端站点接地状态进行检测。基于 PSCAD,对两条线路中远端站点接地状态进行仿真,仿真电路如图 8 所示。其中, L_{c1} 与 C_{c1} 为线路 1 中传输电缆的分布电感与对地电容; L_{c2} 与 C_{c2} 为线路 2 中传输电缆的分布电感与对地电容。

考虑传输电缆对地电容对远端接地状态检测准确度的影响,改变传输电缆长度,对不同传输电缆长度情况下远端接地状态进行检测。分别对 500 m & 1 000 m 及 300 m & 800 m 双传输线路进行扫频阻抗计算。当线路 1 与线路 2 传输电缆长度分别为 500 m 与 1 000 m 时,对线路进行扫频分析,分别测量得到不同接地状态下的电流扫频曲线如图 9 所示。其中,00、01、02、10、11、12、20、21 及 22 分别表示 500 m 线路正常接地且 1 000 m 线路正常接地、500 m 线路正常接地且 1 000 m 线路远端接地断开、500 m 线路正常接地且 1 000 m 线路远端与电缆接地断开、500 m 线路远端接地断开且 1 000 m 线路正常接地、500 m 线路远端接地断开且 1 000 m 线路远端接地断开、500 m 线路远端接地断开且 1 000 m 线路远端与电缆接地断开、500 m 线路远端

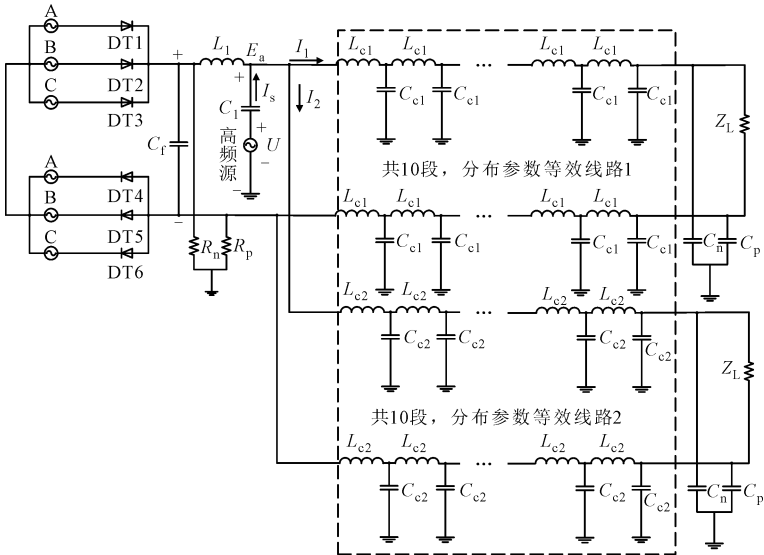


图 8 多线路情况阻抗检测电路

与电缆接地断开且 1 000 m 线路正常接地、500 m 线路远端与电缆接地断开且 1 000 m 线路远端接地断开、500 m 线路远端与电缆接地断开且 1 000 m 线路远端与电缆接地断开。

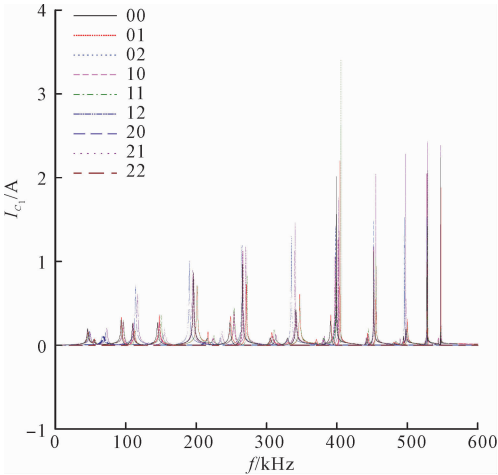


图 9 500 m & 1 000 m 多线路不同接地状态
电流扫频曲线

根据图 9,可以得到 500 m & 1 000 m 双传输电缆线路中不同接地状态时电流的谐振频率。以两条线路中均正常接地时电流谐振频率作为基准值,比较不同接地断开状态时的谐振频率。当谐振频率为 247 kHz 时,其他接地断开状态与正常接地谐振频率差值最大。选择 247 kHz 为高频交流源的频率,如图 9 所示,由测量线路输入端对地电压 E_a 、高频源输出电压 U 、流过隔直电容 C_1 的电流 I_s 、流过线路 1 的电流 I_1 以及流过线路 2 的电流 I_2 ,可以计算得到不同接地状态时的线路 1 对地阻抗 Z_{11} 、线路 2 对地阻抗 Z_{12} 以及高频输出端对地阻抗 Z_s ,不同接地状态时 500 m & 1 000 m 双传输电缆线路阻抗如表 3 所示。

当线路 1 与线路 2 传输电缆长度分别为 300 m 与 800 m 时,对线路进行扫频分析,得到不同接地状态下的电流扫频曲线如图 10 所示。根据图 10,可以得到 500 m & 1 000 m 双传输电缆线路中不同接地状态时电流的谐振频率。以两条线路中均正常接地时电流谐振频率作为基准值,比较不同接地断开状态时谐振频率,当谐振频率为 357 kHz 时,其他接地断开状态与正常接地谐振频率差值最大。选择 357 kHz 为高频交流源的频率,如图 8 所示电路,可以计算得到 Z_{11} 、 Z_{12} 以及 Z_s 见表 4。

根据表 3 与表 4,当网络中发生接地断开故障时,各线路对地阻抗的幅值发生较大变化。定义参数 α 表示线路对地阻抗幅值的变化程度

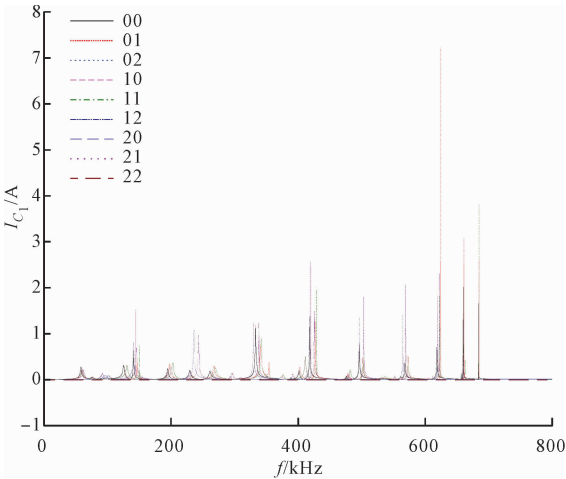


图 10 300 m & 800 m 多线路不同接地状态
电流扫频曲线

表 3 500 m & 1 000 m 双传输电缆线路
不同接地状态对地阻抗

状态	Z_s/Ω	Z_{11}/Ω	Z_{12}/Ω
00	1.00-j68.45	1.97-j8.20	2.01-j7.91
01	1.00-j69.34	1.93-j9.82	2.06-j9.86
02	79.26-j101.72	0.51-j45.14	14.78-j214.18
10	1.00-j68.81	2.01-j9.14	1.97-j8.44
11	1.00-j69.76	1.96-j10.90	2.02-j10.47
12	79.31-j107.09	0.44-j51.64	16.25-j244.99
20	0.87-j73.31	2.31-j24.58	1.40-j13.92
21	0.87-j75.05	2.29-j29.38	1.41-j16.64
22	$1.00\times10^6-j35.58$	$1.50\times10^6-j2.88\times10^4$	$2.99\times10^6-j1.14\times10^5$

表 4 300 m & 800 m 双传输电缆线路
不同接地状态对地阻抗

状态	Z_s/Ω	Z_{11}/Ω	Z_{12}/Ω
00	1.08-j45.45	2.20-j2.40	2.11-j2.26
01	1.09-j46.77	2.12-j4.99	2.19-j4.97
02	0.85-j86.31	0.43-j48.94	26.28-j295.79
10	1.08-j45.72	2.25-j3.04	2.07-j2.72
11	1.08-j47.13	2.18-j5.89	2.13-j5.54
12	0.85-j95.82	0.31-j60.02	30.87-j362.73
20	0.96-j47.70	2.37-j8.56	1.62-j5.68
21	0.97-j49.75	2.35-j13.70	1.63-j9.09
22	$1.00\times10^6-j16.80$	$1.38\times10^6-j3.10\times10^4$	$3.64\times10^6-j2.17\times10^5$

$$\alpha = |Z_2| / |Z_1| \tag{6}$$

计算得到双传输电缆线路中不同接地状态时的 α

值,如表 5 所示。从中可以看出:认为远端与电缆接地均断开的状况比远端接地断开状况更加恶劣;当较长线路发生的接地故障比较短的线路发生的接地故障更加恶劣时,即 01、02、12 状态时, α 值比正常接地时大;当较短线路发生的接地故障比较长的线路中发生的接地故障更加恶劣时,即 10、20、21 状态时, α 值比正常接地时的比较小。

综合考虑对地阻抗幅值以及 α 值的变化,可以对远端接地状态及接地故障所在线路进行检测判断。当线路 1 阻抗比正常接地时对地阻抗大,说明有接地断开故障存在,若 α 值比正常接地时的 α 值大,说明接地断开故障在较长线路中出现,且更加恶劣;若值 α 比正常接地时的 α 值小,说明接地断开故障在较短线路中出现,且更加恶劣。

表 5 不同传输电缆线路中各接地状态情况下的 α 值

状态	α	
	300 m & 800 m 线路	500 m & 1 000 m 线路
00	0.95	0.97
01	1.00	1.01
02	6.08	4.76
10	0.90	0.93
11	0.95	0.96
12	6.07	4.75
20	0.66	0.57
21	0.66	0.57
22	2.64	1.99

4.4 接地状态检测算法

针对远端站点接地状态检测的问题,基于扫频阻抗的计算提出检测算法,算法流程见图 11。

对单条线路或多条线路进行人为选择,当对单条线路中的接地状态进行检测时,保证一次正常接地状态,对正常接地状态下的电路扫频曲线进行测量,并测量计算每一谐振频率点处的对地阻抗。测量实际线路中高频源输出端电流扫频曲线,将该实际线路扫频曲线与正常扫频曲线进行对比,若谐振点频率均值之差未超过设定阈值,则认为线路接地正常;否则测量计算实际线路的谐振点处对地阻抗 Z_1 ,并与正常对地阻抗 Z_0 进行比较,若二者之差超过阈值,则认为线路存在接地断开故障。

当对多条线路中的接地状态进行检测时,保证一次正常接地状态,测量得到该状态下的电路扫频曲线,并计算每一谐振频率点处的各线路对地阻抗以及 α 值,以此为基准值。测量实际线路中高频源

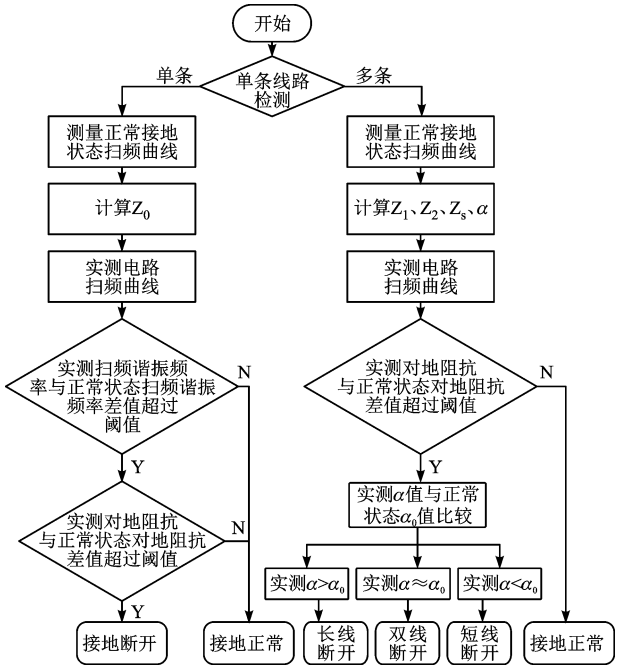


图 11 接地状态检测算法流程图

输出端电流扫频曲线,比较实际线路扫频曲线与正常扫频曲线,根据谐振点频率差值选取特定谐振频率,在该谐振点频率下,测量实际线路中各线路对地阻抗,并与基准值进行比较。若对地阻抗差值超过设定阈值,则测量计算实际线路中的 α 值,将实际线路 α 值与基准值对比,若二者差值超过设定阈值,认为线路存在接地断开故障。根据实际线路中各线路对地阻抗与 α 值的变化趋势,可以对接地断开故障所在线路进行判断。

5 结 论

本文对中压直流供电系统中的远端站点接地状态进行了研究,提出了一种基于扫频阻抗的中压直流供电系统远端站点接地状态检测方法,得到以下结论。

(1)在中压直流供电系统中心站点电源输出侧并联高频交流支路,测量高频交流源输出侧对地阻抗,可以用于检测中压直流供电系统中远端站点接地状态。仿真研究发现,当选择远端站点正常接地状态谐振频率作为高频交流源频率、远端站点发生接地断开状态时,高频回路对地阻抗区分度更大。

(2)研究高频交流源输出侧电流扫频曲线,发现远端站点不同接地状态时的扫频电流谐振频率会发生改变,远端站点发生接地断开故障时的平均谐振频率比远端站点正常接地状态时的平均谐振频率更高,且平均谐振频率随中压直流供电系统传输电缆

长度的增加而降低。

(3)与正常接地状态相比,远端站点发生接地断开故障时,对地阻抗与电流扫频曲线均会发生较大改变,可以作为检测中压直流供电系统单条线路中远端站点接地状态的判据。

(4)对地阻抗与 α 值的变化趋势可以作为判据,检测中压直流供电系统多条线路中远端站点的接地状态,并对接地断开故障所在线路定位。

总之,在中压直流供电系统中心站点输出侧并联高频交流支路,利用本文提出的基于扫频阻抗的中压直流供电系统远端站点接地状态检测方法,可以准确判断中压直流供电系统单条线路是否发生接地断开故障,也可以准确判断及定位发生在中压直流供电系统多条线路中的远端站点接地断开故障,在工程实践中具有较高的实用价值。

参考文献:

- [1] 熊庆,汲胜昌,陆伟锋,等. 低气压下串联直流电弧故障电磁辐射幅值及频率特性[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1071-1079.
XIONG Qing, JI Shengchang, LU Weifeng, et al. Amplitude and frequency characteristics of electromagnetic radiation of series DC arc faults under low pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1071-1079.
- [2] DHARSHANA D, KOLHE M, SHARMA A, et al. Review of information and communication technologies for smart micro-grid automation [C]//2017 7th International Conference on Power Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 842-848.
- [3] 刘小军,熊庆,汲胜昌,等. 针对串联直流电弧的电容电流时频检测法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 152-158, 166.
LIU Xiaojun, XIONG Qing, JI Shengchang, et al. Detection method for series DC arc using time-frequency domain characteristics of capacitive current [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 152-158, 166.
- [4] 陈磊. 基于智能移动终端的通讯线路巡检系统设计与实现[D]. 上海: 复旦大学, 2014: 1-3.
- [5] 裴海根. 基于电网络理论的赣西某变电站接地网故障诊断研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 1-5.
- [6] 李小方. 接地网故障特征提取与融合诊断方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2015: 1-5.
- [7] 张瑞强. 变电站接地网接地性能及其故障诊断成像系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 1-10.

- [8] 刘家军,王睿,周少瑜. 基于4G网络通信的接触网检修接地线监测装置的研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 17-22.
LIU Jiajun, WANG Rui, ZHOU Shaoyu. Research on monitoring device of grounding wire for catenary inspection based on 4G network communication [J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 17-22.
- [9] 张占龙,李德文,郭祥书,等. 线路检修及接地线状态监视预警系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 112-115.
ZHANG Zhanlong, LI Dewen, GUO Xiangshu, et al. A monitoring and warning system for transmission network maintenance and grounding line working conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 17-22.
- [10] 刘洋,崔翔,卢铁兵. 变电站接地网的断点诊断方法[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 21-25.
LIU Yang, CUI Xiang, LU Tiebing. A diagnosis method of breaking points in grounding grid for substations [J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 21-25.
- [11] ZHANG Bo, ZHAO Zhibin, CUI Xiang, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 473-476.
- [12] 齐磊,崔翔,卢铁兵,等. 屏蔽电缆的分布参数测量及瞬态分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 119-123.
QI Lei, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Measurement of distributed parameters and transient analysis of shielded cable [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 119-123.
- [13] 徐政,钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-691.
- [14] ANDREOU G T, LABRIDIS D P. Electrical parameters of low-voltage power distribution cables used for power-line communications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 879-886.
- [15] MCDERMOTT T E. Distribution system data exchanges to support line and cable parameter calculations [C]// Power Engineering Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1-7.

(下转第182页)