



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102135571 B

(45) 授权公告日 2013.04.17

(21) 申请号 201110050694.6

CN 101377529 A, 2009.03.04,

(22) 申请日 2011.03.03

胡志坚等. 长距离高压电缆线路互感参数测量. 《高电压技术》. 2002, 第 28 卷 (第 5 期),

(73) 专利权人 江苏省电力公司苏州供电公司
地址 215004 江苏省苏州市三香路 458 号
专利权人 江苏省电力公司

郭建全等. 基于 GPS 的互感输电线路零序分布参数带电测量研究与实现. 《继电器》. 2005, 第 33 卷 (第 19 期),

国家电网公司
武汉大学

审查员 郭军宏

(72) 发明人 汤峻 高扬 徐建刚 陈志勇
殷鉴 钱杰 胡志坚

(74) 专利代理机构 苏州创元专利商标事务所有
限公司 32103

代理人 孙仿卫

(51) Int. Cl.

G01R 27/08 (2006.01)

(56) 对比文件

US 6043569 A, 2000.03.28,

CN 101149407 A, 2008.03.26,

CN 101349714 A, 2009.01.21,

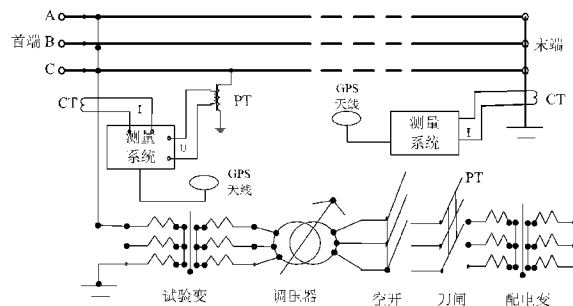
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 1 页

(54) 发明名称

超高压 / 特高压多回路输电线路零序阻抗抗
干扰测量方法

(57) 摘要

一种超高压 / 特高压输电线路零序阻抗参数
抗干扰测量方法, 首先将输电线路停电, 将线路末
端三相短接接地, 首端三相短接, 直接利用输电
线路加压点所在变电站的单相工频电源, 对输电
线路首端进行加压, 同时测量施加在输电线路首
端的零序电压和输电线路两端的零序电流。为消
除工频干扰的影响, 在测量零序阻抗时, 利用所
测量的零序电流和零序电压数据中包含的谐波分
量计算出输电线路的谐波零序阻抗; 最后再换算
为输电线路的工频零序阻抗。



CN 102135571 B

1. 一种超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法,包括如下步骤:

(1)、采集待测输电线路上的零序电流数据和零序电压数据步骤:在其他输电线路正常运行状态下,将待测输电线路停电,使其首端三相短接且末端三相短路接地后,向待测输电线路首端施加电压,同步采集该输电线路首端的零序电压数据 $u_s(k)$ 和首末端的零序电流 $i_s(k)$ 、 $i_m(k)$;

(2)、计算待测输电线路 n 次谐波零序阻抗步骤:

按照如下公式(1)、(2)、(3)得到的输电线路首末两端零序电压和零序电流 n 次谐波的实部分量和虚部分量,

$$\begin{cases} U_{snr} = \sum_{k=0}^{N-1} u_s(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ U_{sni} = \sum_{k=0}^{N-1} u_s(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{snr} = \sum_{k=0}^{N-1} i_s(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ I_{sni} = \sum_{k=0}^{N-1} i_s(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{mnr} = \sum_{k=0}^{N-1} i_m(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ I_{mni} = \sum_{k=0}^{N-1} i_m(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $n \neq 1$; U_{snr} 、 U_{sni} 为输电线路首端零序电压 n 次谐波的实部分量及虚部分量; I_{snr} 、 I_{sni} 为输电线路首端零序电流 n 次谐波的实部分量及虚部分量; I_{mnr} 、 I_{mni} 为输电线路末端零序电流 n 次谐波的实部分量及虚部分量; N 是每个采样周期的采样点数; k 为采样时刻;

从而得到该输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 为:

$$Z_{0n} = \frac{U_{snr} + jU_{sni}}{(I_{snr} + jI_{sni}) + (I_{mnr} + jI_{mni})};$$

(3)、计算待测输电线路的工频零序阻抗步骤:

将上述 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 按下式进行转换以得到该输电线路工频零序阻抗 Z_0 为:

$$Z_0 = \text{real}(Z_{0n}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{0n})}{n};$$

式中, $\text{real}()$ 是指取相量的实部分量, $\text{imag}()$ 是指取相量的虚部分量。

2. 根据权利要求 1 所述的超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法,其特征在于:步骤(2)中,所述的 $n \leq 10$ 。

3. 根据权利要求 2 所述的超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法,其特征在于:所述的 $n = 3$ 或 $n = 5$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法, 其特征在于: 步骤(2)和步骤(3)中, 采样周期取 M 个, 即对 $M \times N$ 个采样数据进行计算, 得到 M 个零序阻抗 Z_0 的测量结果, 再取这个 M 个测量结果的平均值作为输电线路零序阻抗最终的测量结果, $M \geq 1$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法, 其特征在于: 步骤(1)中, 向待测输电线路首端施加的电压为输电线路首端所在变电站的单相交流工频电源电压。

6. 根据权利要求 1 所述的超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法, 其特征在于: 步骤(1)中, 待测输电线路首末端电压电流数据基于 GPS 下进行同步采集。

7. 根据权利要求 1 所述的超高压或特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法, 其特征在于: 当待测输电线路长度等于或大于一百公里时, 输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 采用所述步骤(2)进行计算; 当待测输电线路长度小于一百公里时, 输电线路 n 次

谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 通过下式计算获得:
$$Z_{0n} = \frac{U_{snr} + jU_{sni}}{I_{snr} + jI_{sni}}。$$

超高压 / 特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统输电线路参数测量技术领域,特别是涉及在有干扰的情况下,输电线路零序阻抗的抗干扰测量方法。

背景技术

[0002] 随着电力系统规模的发展,发电厂、变电站出线增多,互感线路越来越多。

[0003] 输电线路参数是短路计算、继电保护及自动化装置定值整定、部分保护元件正确动作和故障分析定位的基础参数,没有准确的线路参数很难保证上述计算结果的准确性,从而影响到电力系统的安全、稳定、经济运行。

[0004] 线路的零序阻抗和线路之间的零序互阻抗会影响到线路故障状态,特别是影响零序电流的大小,对零序电流保护的影响极大。由于线路之间的零序互阻抗受到很多因素的影响,如线路的相间距离、线路之间的距离、线路走向、零序电流流经区域的接地电阻率等。理论计算值无法满足继电保护整定值计算的精度要求,如采用计算值作为整定计算的依据,会使保护在系统故障时产生拒动或误动,这直接威胁到系统的安全与稳定运行。因此,在中华人民共和国电力行业标准中,关于继电保护整定的规定指出:架空线路和电缆的零序阻抗、平行线间的零序互感阻抗、其它对继电保护影响较大的参数应使用实测值。

[0005] 输电线路参数测量已有多年的历史,但传统的测量方法均是在线路停电时进行测试。受线路走廊所限和出于经济输电的目的,目前同杆并架双回线路、四回线路和有互感耦合的多回线路的日益增多。鉴于线路间的电磁耦合,被测输电线路即使停电,也会存在工频干扰,这使得传统方法即使在停电状态下对于此类输电线路也无法奏效。因此对于现代电网来说,要为线路参数的正确测量而将所有有互感耦合的线路停电,这几乎是不可行的。尤其是近年来特高压(750-1000kV)输电线路的出现,按照现有测量方法测量的输电线路参数结果更加不可靠。

[0006] 因此,寻求一种新的互感线路零序阻抗参数抗干扰测量方法,是电力系统运行部门所急需的,不仅具有重要的理论价值,而且具有很大的经济效益与社会效益,本申请正是基于上述目的而进行的开发设计。

发明内容

[0007] 本发明目的是提供一种无需将所有多回路输电线路停电而进行其中一输电线路零序阻抗参数的准确测量的方法。

[0008] 为了达到上述目的,本发明所采用的技术方案为:一种超高压 / 特高压多回路输电线路零序阻抗抗干扰测量方法,包括如下步骤:

[0009] (1)、采集待测输电线路上的零序电流数据和零序电压数据步骤:在其他输电线路正常运行状态下,将待测输电线路停电,使其首端三相短接且末端三相短路接地后,向该输电线路首端施加电压,同步采集该输电线路首端的零序电压数据 $u_0(k)$ 和首末端的零序电流 $i_s(k)$ 、 $i_m(k)$;

[0010] (2)、计算待测输电线路 n 次谐波零序阻抗步骤：

[0011] 按照如下公式(1)、(2)、(3)得到的输电线路首末两端零序电压和零序电流 n 次谐波的实部分量和虚部分量，

$$[0012] \begin{cases} U_{s7R} = \sum_{k=0}^{N-1} u_s(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ U_{s7I} = \sum_{k=0}^{N-1} u_s(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$[0013] \begin{cases} I_{s7R} = \sum_{k=0}^{N-1} i_s(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ I_{s7I} = \sum_{k=0}^{N-1} i_s(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$[0014] \begin{cases} I_{m7R} = \sum_{k=0}^{N-1} i_m(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ I_{m7I} = \sum_{k=0}^{N-1} i_m(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (3)$$

[0015] 其中， $n \neq 1$ ； U_{s7R} 、 U_{s7I} 为输电线路首端零序电压 n 次谐波的实部分量及虚部分量； I_{s7R} 、 I_{s7I} 为输电线路首端零序电流 n 次谐波的实部分量及虚部分量； I_{m7R} 、 I_{m7I} 为输电线路末端零序电流 n 次谐波的实部分量及虚部分量； N 是每个采样周期的采样点数； k 为采样时刻；

[0016] 从而得到该输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 为：

$$[0017] Z_{0n} = \frac{U_{s7R} + jU_{s7I}}{\frac{(I_{s7R} + jI_{s7I}) + (I_{m7R} + jI_{m7I})}{2}} ;$$

[0018] (3)、计算待测输电线路的工频零序阻抗步骤：

[0019] 将上述 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 按下式进行转换以得到该输电线路工频零序阻抗 Z_0 为：

$$[0020] Z_0 = \text{real}(Z_{0n}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{0n})}{n} ;$$

[0021] 式中， $\text{real}()$ 是指取相量的实部分量， $\text{imag}()$ 是指取相量的虚部分量。

[0022] 对上述技术方案所进一步变换和解释如下：

[0023] 步骤(2)中，所述的 $n \leq 10$ ，尤其取 3 次或 5 次谐波分量进行计算更为合适。

[0024] 在进行零序电压和电流采样时，采样周期可取 M 个，即对 $M \times N$ 个采样数据

[0025] 进行计算,得到 M 个零序阻抗 Z_{0n} 的测量结果,再取这个 M 个测量结果的平均值作为输电线路零序阻抗最终的测量结果,其中 $M \geq 1$,通过采用多个采样周期,可进一步提高测量精度。

[0026] 步骤(1)中,向待测输电线路首端施加的电压为输电线路首端所在变电站的单相交流工频电源电压,这样避免采用异频电源易产生干扰电压和干扰电流的缺陷,保证测量结果的精确性。

[0027] 步骤(1)中,待测输电线路首末端电压电流数据基于 GPS 下进行同步采集。

[0028] 当待测输电线路长度等于或大于一百公里时,输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 采用所述步骤(2)进行计算;当待测输电线路长度小于一百公里时,输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 通过下式计算获得:

$$[0029] \quad Z_{0n} = \frac{U_{snp} + jU_{snl}}{I_{snp} + jI_{snl}}。$$

[0030] 由于采用上述技术方案,本发明具有以下优点:本发明在其他输电线路不停电状态下,即存在工频干扰的情况下,通过采集待测输电线路的首末端零序电压和零序电流,利用测量的零序电压和零序电流的谐波分量来计算输电线路的零序阻抗,即通过把工频量当成是谐波分量滤除,从而消除工频干扰对测量结果的影响,大大提高了输电线路零序阻抗测量结果的精确性和精度。

附图说明

[0031] 附图 1 为本发明零序阻抗测量方法接线图;

具体实施方式

[0032] 下面结合附图,对本发明优选的具体实施例进行说明:

[0033] 图 1 所示的是为一路待测输电线路,该待测输电线路首末端分别与所在侧变电站相连接,在两相邻变电站之间还具有其他多路输电线路(图中未显示),本发明测量方法在其他多路输电线路不停电情况下,对该待测输电线路参数进行测量。

[0034] 本发明主要对该待测输电线路的零序阻抗进行测量,为测量该零序阻抗,首先,将该路输电线路停电,并将该输电线路末端三相短路接地,其首端三相短接,在输电线路的首端施加输电线路加压点所在变电站的单相交流工频电压,通过电压互感器 PT 及电流互感器 CT 分别测量该输电线路首末端零序电流和零序电压。本实施例中,输电线路首末端零序电流和零序电压采用 GPS 进行同步测量,测量的结果分别存入测量系统的存储器中或以文件的方式存入计算机的硬盘中。有关测量系统的组成及工作原理可参见在先申请的申请号为 200710181976.3、名称为一种互感线路零序参数带电测量装置的专利,在此对其不在赘述。

[0035] 由于该输电线路的末端接地,因此,该末端的零序电压为零,故通过上述测量可得到输电线路首端零序电压数据 $u_0(k)$ 、零序电流数据 $i_0(k)$ 和输电线路末端零序电压数据

$i_m(k)$, 对得到的数据采用下述公式(1)、(2)和(3)进行计算, 以得到输电线路首末两端零序电压和零序电流 n 次谐波的实部分量和虚部分量:

$$[0036] \quad \begin{cases} U_{s0n} = \sum_{k=0}^{N-1} u_s(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ U_{s0n} = \sum_{k=0}^{N-1} u_s(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$[0037] \quad \begin{cases} I_{s0n} = \sum_{k=0}^{N-1} i_s(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ I_{s0n} = \sum_{k=0}^{N-1} i_s(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (2)$$

$$[0038] \quad \begin{cases} I_{m0n} = \sum_{k=0}^{N-1} i_m(k) \cos\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \\ I_{m0n} = \sum_{k=0}^{N-1} i_m(k) \sin\left(n \frac{2\pi}{N} k\right) \end{cases} \quad (3)$$

[0039] 上述各式中, U_{s0n} 为输电线路首端零序电压 n 次谐波的实部分量, U_{s0n} 为输电线路首端零序电压 n 次谐波的虚部分量; I_{s0n} 为输电线路首端零序电流 n 次谐波的实部分量, I_{s0n} 为输电线路首端零序电流 n 次谐波的虚部分量; I_{m0n} 为输电线路末端零序电流 n 次谐波的实部分量, I_{m0n} 为输电线路末端零序电流 n 次谐波的虚部分量; N 是每个采样周期的采样点数; k 为采样时刻, $u_s(k)$ 、 $i_s(k)$ 和 $i_m(k)$ 为 k 时刻的采样数据。

[0040] 按照上述公式(1)、(2)、(3), 我们可以依次得到:

[0041] 输电线路首端零序电压的 n 次谐波向量 \dot{U}_{s0n} 为:

$$[0042] \quad \dot{U}_{s0n} = U_{s0n} + jU_{s0n} \quad (4)$$

[0043] 输电线路首端零序电流的 n 次谐波向量 \dot{I}_{s0n} 为:

$$[0044] \quad \dot{I}_{s0n} = I_{s0n} + jI_{s0n} \quad (5)$$

[0045] 输电线路末端零序电流的 n 次谐波向量 \dot{I}_{m0n} 为:

$$[0046] \quad \dot{I}_{m0n} = I_{m0n} + jI_{m0n} \quad (6)$$

[0047] 得到上述各谐波向量后, 可根据输电线长度分成如下两种情况计算 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} :

[0048] (1)、当输电线路长度等于或大于 100 公里时, 采用公式(7) 计算输电线路 n 次谐

波对应的零序阻抗,输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 为:

$$[0049] \quad Z_{0n} = \frac{\dot{U}_{s0n}}{\frac{\dot{I}_{s0n} + \dot{I}_{m0n}}{2}} \quad (7)$$

[0050] (2)、当输电线路长度小于 100 公里时,采用公式(8)计算输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗,输电线路 n 次谐波对应的零序阻抗 Z_{0n} 为:

$$[0051] \quad Z_{0n} = \frac{\dot{U}_{s0n}}{\dot{I}_{s0n}} \quad (8)$$

[0052] 在得到 n 次谐波对应的零序阻抗后,我们可根据该 n 次谐波零序阻抗按照公式(9)转换成输电线路在工频时的零序阻抗 Z_0 ,

$$[0053] \quad Z_0 = \text{real}(Z_{0n}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{0n})}{n} \quad (9)$$

[0054] 公式(9)式中, $\text{real}()$ 是指取相量的实部分量, $\text{imag}()$ 是指取相量的虚部分

[0055] 量。

[0056] 为消除工频干扰的影响,不能取工频量进行计算,即 $n \neq 1$, 且, $n \leq 10$, 通常取 3 次或 5 次谐波分量进行计算较为合适,即 $n = 3$ 或 $n = 5$ 。

[0057] 为提高测量精度,可以取 M 个采样周期,即 M 个采样数据进行计算,得到 M 个零序阻抗 Z_0 的测量结果,再取这个 M 个测量结果的平均值作为输电线路零序阻抗最终的测量结果, $M \geq 1$ 。

[0058] 下面为给出本发明一应用实例,以清楚说明本发明:

[0059] 设有两条有互感耦合的 500kV 互感线路 I 和线路 II,线路 I 为已投运的带电运行线路,线路 II 为新建线路,线路 II 长度设为 50km 和 200km 两种情况。

[0060] 现需要测量线路 II 的零序自阻抗。由于线路 I 已投运,且在测量线路 II 的参数时,线路 I 不能停电。由于互感(即干扰)的影响,因此线路 II 参数的测量将受到很大的影响。现采用本发明提出的抗干扰测量方法对线路 I 零序自阻抗参数的进行测量。

[0061] 利用 MATLAB 进行仿真。线路 II 的精确参数如下表所示。

[0062]

	正序电容 (F/km)	零序电容 (F/km)	正序阻抗 (Ω /km)	零序自阻抗 (Ω /km)
线路 II	12.74e-9	7.25e-9	0.05+j0.2859	0.15+j0.9425

[0063] 在线路 I 上加上 2000V 工频电压和 300V 的三次谐波电压,其中所加的三次谐波电

压用于模拟实际线路加压时由于试验变等因素所产生的三次谐波电压。线路 II 带电运行。线路 II 两端的电压分别为 $500 \angle 20^\circ$ kV 和 $500 \angle 30^\circ$ kV。

[0064] 测量接线图如附图 1 所示。

[0065] 由于工频干扰（即互感）的影响，在测量线路 II 的零序自阻抗参数时，带电运行的线路 I 将对测量结果产生影响。为消除此工频干扰的影响，只取测量数据中的三次谐波分量进行计算。

[0066] （一）线路 II 为 50km

[0067] 线路 II 为 50km 时，利用公式(1)~(3) 进行计算，得到输电线路首末两端零序电压和零序电流各次谐波的实部分量和虚部分量。再利用公式(4)~(6) 计算得到输电线路首末两端电压和电流三次谐波的相量，得到线路 II 首端的三次谐波零序电压为 $\dot{U}_{s03} = 122.64 \angle 19.987^\circ$ V，首端的三次谐波零序电流为 $\dot{I}_{s03} = 0.84534 \angle -66.583^\circ$ A。测量得到的线路 II 末端的三次谐波零序电流为 $\dot{I}_{m03} = 0.87195 \angle -66.744^\circ$ A。

[0068] 利用公式(7) 计算得到输电线路三次谐波对应的零序阻抗 Z_{03} 为：

$$[0069] \quad Z_{03} = \frac{\dot{U}_{s03}}{\frac{\dot{I}_{s03} + \dot{I}_{m03}}{2}} = \frac{122.64 \angle 19.987^\circ}{\frac{0.84534 \angle -66.583^\circ + 0.87195 \angle -66.744^\circ}{2}}$$

$$= 8.342 + j142.590 \quad (\Omega)$$

[0070] 利用公式(9) 计算得到输电线路工频时的零序自阻抗 Z_0 为

$$[0071] \quad Z_0 = \text{real}(Z_{03}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{03})}{3}$$

$$= 8.342 + j47.530 \quad (\Omega)$$

[0072] 线路 II 为 50km 时零序自阻抗的精确参数为：

[0073]

$$Z_0' = 50 \times (0.15 + j0.9425) = 7.500 + j47.125 \quad (\Omega)$$

[0074] 线路 II 为 50km 时零序自阻抗测量的相对误差为：

[0075]

$$\text{相对误差} = \frac{|Z_0' - Z_0|}{|Z_0'|} \times 100\% = \frac{|(7.500 + j47.125) - (8.342 + j47.530)|}{|7.500 + j47.125|} \times 100\%$$

$$= 1.13\%$$

[0076] 利用公式(8) 计算得到输电线路三次谐波对应的零序阻抗 Z_{03} 为：

$$[0077] \quad Z_{03} = \frac{\dot{U}_{s03}}{\dot{I}_{s03}} = \frac{122.64 \angle 19.987^\circ}{0.84534 \angle -66.583^\circ}$$

$$= 8.680 + j144.820 \quad (\Omega)$$

[0078] 利用公式(9) 计算得到输电线路工频时的零序自阻抗 Z_0 为

$$\begin{aligned}
 [0079] \quad Z_0 &= \text{real}(Z_{03}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{03})}{3} \\
 &= 8.680 + j48.273 \quad (\Omega)
 \end{aligned}$$

[0080] 线路 II 为 50km 时零序自阻抗测量的相对误差为：

[0081]

$$\begin{aligned}
 \text{相对误差} &= \frac{|Z'_0 - Z_0|}{|Z'_0|} \times 100\% = \frac{|(7.500 + j47.125) - (8.680 + j48.273)|}{|7.500 + j47.125|} \times 100\% \\
 &= 2.79\%
 \end{aligned}$$

[0082] 两者情况下的测量误差分别为 1.13% 和 2.79%，可见，采用输电线路首末两端电流相量的平均值进行零序自阻抗的计算，从而大大地提高了测量结果的精度。

[0083] (二) 线路 II 为 200km

[0084] 线路 II 为 200km 时，利用公式(1)~(3)进行计算，得到输电线路首末两端零序电压和零序电流各次谐波的实部分量和虚部分量。再利用公式(4)~(6) 计算得到输电线路首末两端电压和电流三次谐波的相量，测量得到的线路 II 首端的三次谐波零序电压为 $\dot{U}_{s03} = 122.44 \angle 20.005^\circ$ V，首端的三次谐波零序电流为 $\dot{I}_{s03} = 0.15684 \angle -65.707^\circ$ A。测量得到的线路 II 末端的三次谐波零序电流为 $\dot{I}_{m03} = 0.24616 \angle -67.414^\circ$ A。

[0085] 利用公式(7) 计算得到输电线路三次谐波对应的零序阻抗 Z_{03} 为：

$$\begin{aligned}
 [0086] \quad Z_{03} &= \frac{\dot{U}_{s03}}{\frac{\dot{I}_{s03} + \dot{I}_{m03}}{2}} = \frac{122.44 \angle 20.005^\circ}{\frac{0.13928 \angle -65.105^\circ + 0.25548 \angle -67.569^\circ}{2}} \\
 &= 35.665 + j619.430 \quad (\Omega)
 \end{aligned}$$

[0087] 利用公式(9) 计算得到输电线路工频时的零序自阻抗 $Z_{0\omega}$ 为

$$\begin{aligned}
 [0088] \quad Z_0 &= \text{real}(Z_{03}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{03})}{3} \\
 &= 34.403 + j202.240 \quad (\Omega)
 \end{aligned}$$

[0089] 线路 II 为 200km 时零序自阻抗的精确参数为：

[0090]

$$Z'_0 = 200 \times (0.15 + j0.9425) = 30.000 + j188.500 \quad (\Omega)$$

[0091] 线路 II 为 200km 时零序自阻抗测量的相对误差为：

[0092]

$$\begin{aligned}
 \text{相对误差} &= \frac{|Z'_0 - Z_0|}{|Z'_0|} \times 100\% = \frac{|(30.000 + j188.500) - (34.403 + j202.240)|}{|30.000 + j188.500|} \times 100\% \\
 &= 7.48\%
 \end{aligned}$$

[0093] 利用公式(8)计算得到输电线路三次谐波对应的零序阻抗 Z_{03} 为：

$$\begin{aligned} Z_{03} &= \frac{\dot{U}_{s03}}{\dot{I}_{s03}} = \frac{122.44 \angle 20.005^\circ}{0.15684 \angle -65.707^\circ} \\ [0094] \quad &= 58.370 + j778.480 \quad (\Omega) \end{aligned}$$

[0095] 利用公式(9)计算得到输电线路工频时的零序自阻抗 Z_0 为

$$\begin{aligned} Z_0 &= \text{real}(Z_{03}) + j \times \frac{\text{imag}(Z_{03})}{3} \\ [0096] \quad &= 58.370 + j259.490 \quad (\Omega) \end{aligned}$$

[0097] 线路 II 为 200km 时零序自阻抗测量的相对误差为：

[0098]

$$\begin{aligned} \text{相对误差} &= \frac{|Z'_0 - Z_0|}{|Z'_0|} \times 100\% = \frac{|(30.000 + j188.500) - (58.370 + j259.490)|}{|30.000 + j188.500|} \times 100\% \\ &= 39.35\% \end{aligned}$$

[0099] 两者情况下的测量误差分别为 7.48% 和 39.35%，可见，采用输电线路首末两端电流相量的平均值进行零序自阻抗的计算，从而大大地提高了测量结果的精度。

[0100] 上述实施例利用测量电压和测量电流中的谐波分量(主要是三次或五次谐波)来计算输电线路的零序阻抗，把工频量当成是谐波分量滤除，从而消除了工频干扰对测量结果的影响，具体优点如下：

[0101] 1、保证在其他输电线路不停电即存在工频干扰的情况下，准确测量待测输电线路的零序阻抗参数；

[0102] 2、直接利用变电站的工频电源进行加压，即使在干扰很大的情况下，也可进行测量。

[0103] 3、在输电线路较长、电压等级较高时，采用输电线路首末两端电流相量的平均值进行计算，从而大大地提高了测量结果的精度。

[0104] 上述对本发明所优选的实施例进行了说明，但是上述实施例并不能理解为对本发明保护范围的限制，凡根据本发明精神实质所作的等效变化或修饰，都应涵盖在本发明的保护范围之内。

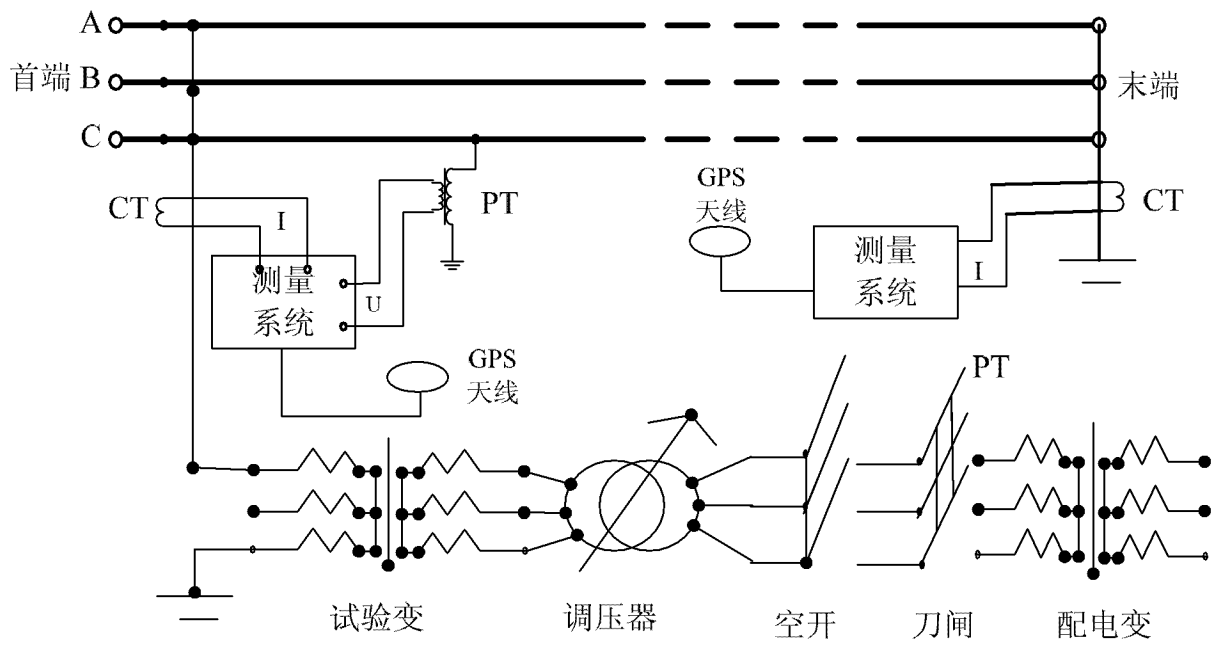


图 1