

ICS 27.100

F 29

备案号：54019—2016



中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1583 — 2016

交流输电线路工频电气参数测量导则

Guide for power frequency parameter measurement of AC transmission lines

2016-02-05发布

2016-07-01实施

国家能源局 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和符号	1
4 总则	3
5 线路电气参数测量前的试验	4
6 直流电阻测量	6
7 单回交流线路指定频率点的电气参数测量与计算	7
8 同塔双回线路间指定频率点的耦合参数测量与计算	10
9 异频测量数据的处理分析	13
10 测量中的注意事项	14
附录 A (资料性附录) 两相交流系统及其对称分量法	15
附录 B (资料性附录) 短距离输电线路参数的快速算法	17
附录 C (规范性附录) 试验设备与测量仪器	18

前　　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 的规则起草。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业高压试验技术标准化技术委员会归口。

本标准主要起草单位：中国南方电网超高压输电公司检修试验中心、国网四川省电力公司电力科学研究院、武汉大洋义天科技股份有限公司、国网河北省电力公司电力科学研究院。

本标准参加起草单位：国网电力科学研究院、国网湖北省电力公司电力科学研究院、武汉大学、中国电力科学研究院、国网福建省电力公司电力科学研究院、国网华北电力科学研究院有限责任公司。

本标准主要起草人：肖遥、李建明、范毅、邓军、苏红梅、杨琳、吴天宝、程澜、张致、关伟民、李澍森。

本标准参与起草人：陈勇、楚金伟、郑雄伟、傅智为、袁亦超、戚革庆。

本标准是首次颁布。

本标准执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

交流输电线路工频电气参数测量导则

1 范围

本标准规定了交流输电线路工频电气参数测量技术方法。

本标准适用于交流架空输电线路和电力电缆线路的工频电气参数测量。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.19 电工术语 高电压试验技术和绝缘配合

GB/T 2900.50—2008 电工术语 发电、输电及配电 通用术语

GB/T 2900.73—2008 电工术语 接地与电击防护

GB/T 16927.3 高电压试验技术 第3部分：现场试验的定义及要求

GB 26859 电力安全工作规程 电力线路部分

GB 26860 电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分

GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准

3 术语和符号

3.1 术语

GB/T 2900.19、GB/T 2900.50—2008、GB/T 2900.73—2008 界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1.1

工频 **power frequency**

交流电力系统的标称频率值。

[GB/T 2900.50—2008, 定义 601-01-05]

注：我国电力系统的标称频率为 50Hz。

3.1.2

异频法 **different frequency method**

为避免电力系统工频感应信号对被测线路的干扰，对被测线路施加接近于工频的电源进行参数测量，并滤除掉测量信号中的工频感应分量，实现精确测量和分析的方法。

3.1.3

首端 **head of line**

在输电线路参数测量过程中，对被测线路拟施加电源的一端。

3.1.4

末端 **end of line**

在输电线路参数测量过程中，与首端相对应的被测线路的另一端。

3.1.5

单位长度的参数 **distributed parameter per unit length**

输电线路单位长度的电阻、电感、电容等参数。

注：输电线路单位长度一般选择为 1km。

3.1.6

单位长度电阻 distributed resistance per unit length

输电线路单位长度的交流电阻值。

3.1.7

单位长度电感 distributed reactance per unit length

输电线路单位长度的交流电感值。

3.1.8

单位长度电导 distributed conductance per unit length

输电线路单位长度的电导值。

3.1.9

单位长度电容 distributed capacitance per unit length

输电线路单位长度的电容值。

3.1.10

等值集中参数 lumped equivalent parameter

表述输电线路等值电路的参数；细分为正序等值集中参数、零序等值集中参数。输电线路采用等值电路及相应等值集中参数后，线路首、末端的电压和电流的幅值及相位与采用单位长度参数描述的输电线路首、末端电压和电流的幅值及相位相同。

注：输电线路的等值电路有Π型等值电路和T型等值电路两种。在电力系统计算中一般采用Π型等值电路。

3.1.11

短路阻抗 short circuit impedance

线路末端短路的条件下，线路首端的入端阻抗。

3.1.12

正序短路阻抗 positive sequence short circuit impedance

线路末端短路的条件下，线路首端的正序入端阻抗。

注：对于三相系统，正序电压/电流指三相幅值相等，相位按照 ABC 顺序分别达到最大值且互差 120°的电压/电流。对于两相系统，正序电压/电流指两相幅值相等，相角互差 180°的电压/电流。

3.1.13

零序短路阻抗 zero sequence short circuit impedance

线路末端短路接地的条件下，线路首端的零序入端阻抗。

3.1.14

开路阻抗 open circuit impedance

线路末端开路的条件下，线路首端的入端阻抗。

3.1.15

正序开路阻抗 positive sequence open circuit impedance

线路末端开路的条件下，线路首端的正序入端阻抗。

注：对于三相系统，正序电压/电流指三相幅值相等，相位按照 ABC 顺序分别达到最大值且互差 120°的电压/电流。对于两相系统，正序电压/电流指两相幅值相等，相角互差 180°的电压/电流。

3.1.16

零序开路阻抗 zero sequence open circuit impedance

线路末端开路的条件下，线路首端的零序入端阻抗。

3.1.17

接地 grounded

在系统、装置或设备的给定点与局部地之间做电气连接。

[参考 GB/T 2900.73—2008, 195-01-08]

3.2 符号、代号和缩略词

- c_0 ——单相线路单位长度的对地电容, 单位为 pF/km;
 c_m ——线路单位长度的相间耦合电容, 单位为 pF/km;
 c_{I-II} ——同塔双回输电线路中三相线路 I 和线路 II 之间单位长度的耦合电容, 单位为 pF/km;
TA——电流互感器;
 D ——线路的长度, 单位为 km;
 f ——测量用电源输出信号的主频率, 可以代指工频频率, 也可以代指异频频率, 单位为 Hz;
 f_s ——工频频率, 又称系统频率, 单位为 Hz;
 l ——单相线路单位长度的自电感, 单位为 mH/km;
 m ——线路单位长度的相间耦合电感, 单位为 mH/km;
 m_{I-II} ——同塔双回输电线路中, 三相线路 I 与线路 II 之间单位长度的耦合电感值, 单位为 mH/km;
TV——电压互感器;
 R ——线路直流电阻, R_A 表示 A 相线路的直流电阻, R_{AB} 表示 A 相、B 相线路串联后的直流电阻, 单位为 Ω ;
 r ——单相线路单位长度的电阻, 单位为 Ω/km ;
 r_g ——单位长度的大地电阻, 单位为 Ω/km ;
 U_S ——试验电源;
 y_0 ——线路单位长度的零序导纳, 单位为 S/km;
 y_1 ——线路单位长度的正序导纳, 单位为 S/km;
 Y' ——输电线路Π型等值电路的并联导纳, 单位为 S;
 z_0 ——线路单位长度的零序阻抗, 单位为 Ω/km ;
 z_1 ——线路单位长度的正序阻抗, 单位为 Ω/km ;
 $z_{c,0}$ ——线路的零序特征阻抗, 单位为 Ω ;
 $z_{c,1}$ ——线路的正序特征阻抗, 单位为 Ω ;
 Z_{S0} ——线路的零序短路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 Z_{S1} ——线路的正序短路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 $Z_{S0, I-II}$ ——同塔双回线路的零序短路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 $Z_{S1, I-II}$ ——同塔双回线路的正序短路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 Z_{O0} ——线路的零序开路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 Z_{O1} ——线路的正序开路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 $Z_{O0, I-II}$ ——同塔双回线路的零序开路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 $Z_{O0, I-II}$ ——同塔双回线路的正序开路阻抗测量值, 单位为 Ω ;
 Z' ——线路Π型等值电路的串联阻抗, 单位为 Ω ;
 γ_0 ——线路的零序传播系数, 单位为 1/km;
 γ_1 ——线路的正序传播系数, 单位为 1/km。

4 总则

4.1 一般要求

- 4.1.1 依照 GB 50150 的规定, 线路的交接试验应包含线路参数测量内容。
4.1.2 新建和改建的单回交流输电线路, 在运行前应进行线路单位长度电阻、电感、电容等工频电气参数的测量。

4.1.3 新建和改建的同塔双回输电线路，在运行前应进行双回线路之间的工频单位长度的耦合电感、耦合电容的测量。

4.2 测试前须具备的条件

测试前应具备以下条件：

- 确认被测线路已竣工，并已验收合格，所有安全接地线已拆除。试验前，应确保被测线路上无人作业；
- 被测线路沿线无雷雨等恶劣天气；
- 断开被测线路与电抗器、电容器、分压器等设备的引线，以避免测量结果误差过大。

4.3 线路电气参数测试前的试验项目

线路电气参数测试前应对被测线路进行下列测量：

- 测量感应电压；
- 测量感应电流；
- 测量绝缘电阻；
- 核对相别。

4.4 线路电气参数测量项目

线路电气参数测量应包括下列内容：

- 直流电阻；
- 指定频率点的正序短路阻抗和正序开路阻抗；
- 指定频率点的零序短路阻抗和零序开路阻抗；
- 同塔双回线路构成的两相系统在指定频率点的正序短路阻抗和正序开路阻抗；
- 同塔双回线路构成的两相系统在指定频率点的零序短路阻抗和零序开路阻抗。

4.5 架空线和电缆混合线路参数的测量

当被测线路由架空线路和电缆线路串联构成时，可测量混合线路的电气参数，必要时应分别测量架空线段和电缆线段的电气参数。

4.6 测量电源的频率选取

4.6.1 当被测线路不存在工频感应电压和感应电流时，可直接选用工频电源进行测量。

4.6.2 当被测线路存在工频感应电压和感应电流时，为保证线路电气参数测量结果的准确度，应采用异频法进行测量。一般情况下，选取 $f_s - \Delta f$ 和 $f_s + \Delta f$ 两个频率点进行测量。频率偏差 Δf 通常可取 2.5Hz、5Hz、7.5Hz、10Hz。

5 线路电气参数测量前的试验

5.1 感应电压

5.1.1 线路末端短路条件下的感应电压

如图 1 所示，将被测线路末端三相短路接地，通过阻容分压器在线路首端测量各相对地感应电压，并记录交流分量和直流分量。

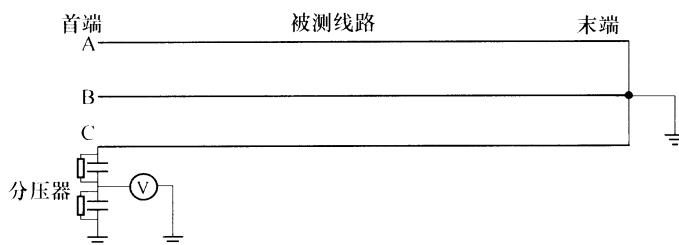


图 1 末端短路条件下工频感应电压测量

5.1.2 线路末端开路条件下的感应电压

如图 2 所示, 将被测线路首、末端开路(悬空), 通过阻容分压器在线路首端测量各相的感应电压, 并记录交流分量和直流分量。

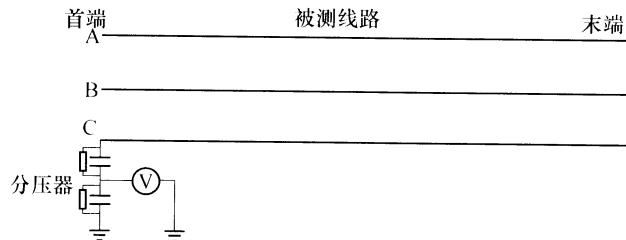


图 2 末端开路条件下工频感应电压测量

5.2 感应电流

如图 3 所示, 将被测线路首、末端三相分别通过测量引下线接地, 用钳形电流表在线路首端引下线分别测量各相的感应电流及三相入地电流, 并记录交流分量和直流分量。

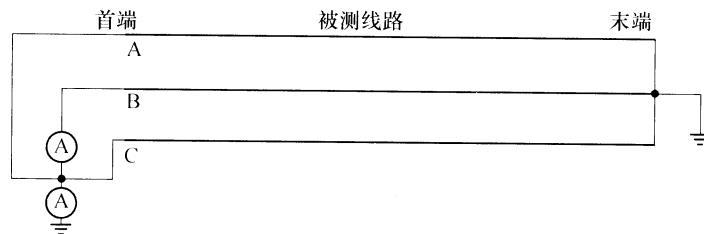


图 3 工频感应电流测量

5.3 线路相别核对及绝缘电阻测量

5.3.1 直流电源法核对线路的相别

当被测线路的感应电压较高时, 宜采用直流电源法核对相别。具体步骤和方法如下:

- 如图 4a) 所示, 将 A 相线路末端 A' 接地, 其余各相首、末端开路。在 A 相线路首端与接地装置之间施加直流电源, 测量 A 相线路首端的入地直流电流。若测量引线中有直流电流时, 可暂定 A 端与 A' 端同为 A 相。若测量引线中没有直流电流时, 则可初步判断相别标识错误, 或者 A 相线路中间有断开点。
- 如图 4b) 所示, 将 A 相线路末端 A' 悬空, 若测量引线中没有直流电流, 则可确定 A 端与 A' 端同为 A 相; 若测量引线中有直流电流, 则 A 相沿线有接地点。
- 线路 B 相与 C 相核对相别的方法参照 A 相的核对方式。

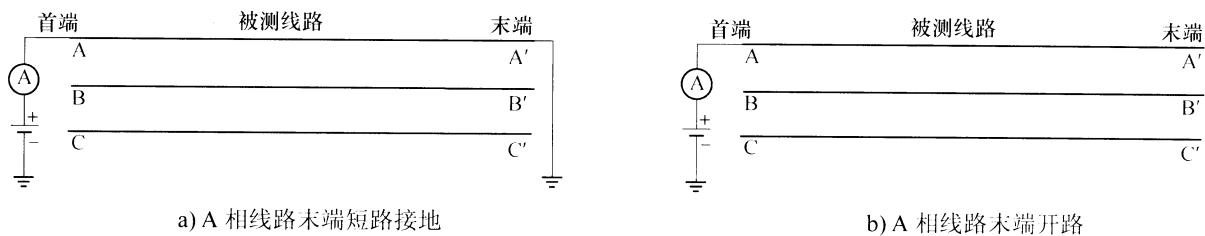


图 4 用直流电源法核对相别

5.3.2 绝缘电阻法核对相别和测量绝缘电阻

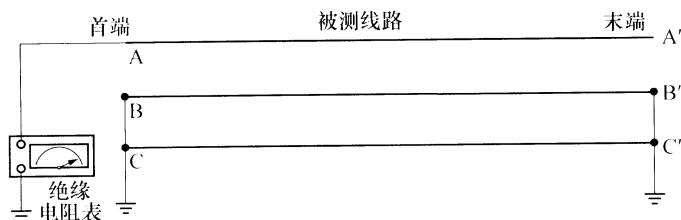
当被测线路的感应电压较低时, 可采用绝缘电阻法核对相别和测量绝缘电阻。具体步骤和方法如下:

- 如图 5a) 所示, 在进行 A 相线路相别核对和绝缘电阻测量过程中, 将 B 相、C 相的首、末端

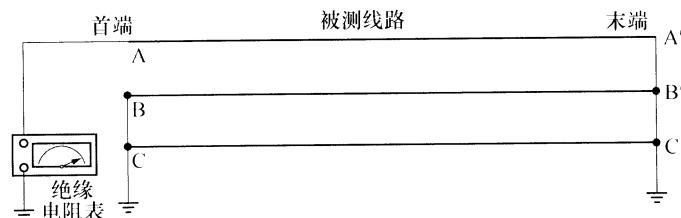
接地，A相线路两端开路。用5000V或10 000V绝缘电阻表对A相进行绝缘电阻的测量。若绝缘电阻不为零，初步判断A相线路两端的相别标识一致，记录绝缘电阻值；若绝缘电阻为零，则可初步判断相别标识错误，或者线路中间有接地点。

- b) 如图5b)所示，将A相线路的末端接地，再次测量A相线路绝缘电阻值，若绝缘电阻为零，则可判断A相线路两端的相别标识一致。若绝缘电阻不为零，则A相线路中间有断开点。
- c) 线路B相和C相的绝缘电阻测量及核相方法与A相测量方法相同。

注：线路两端若有电磁式电压互感器，将对绝缘电阻表进行绝缘测量的结果产生影响。在此条件下，应断开电磁式电压互感器的高压引线。



a)单相线路末端开路条件下的绝缘电阻测量



b)单相线路末端短路条件下的相别标示复核

图5 单相线路相位核对及绝缘电阻测量接线

6 直流电阻测量

6.1 测量方法

如图6所示，被测线路末端三相短路，首端开路并在A相和B相之间施加直流电压，测量直流电压 U_{AB} 和直流电流 I_{AB} 。A相和B相线路的总直流电阻 R_{AB} 为：

$$R_{AB} = U_{AB} / I_{AB} \quad (1)$$

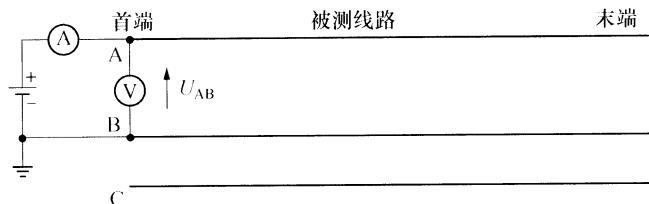


图6 直流电阻测量

逐次测量B相和C相线路的相间总直流电阻 R_{BC} 、C相和A相线路的相间总直流电阻 R_{CA} ，则各相的直流电阻为：

$$\begin{aligned} R_A &= (R_{AB} + R_{CA} - R_{BC}) / 2 \\ R_B &= (R_{AB} + R_{BC} - R_{CA}) / 2 \\ R_C &= (R_{CA} + R_{BC} - R_{AB}) / 2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中：

R_A ——A相的直流电阻值, Ω ;

R_B ——B相的直流电阻值, Ω ;

R_C ——C相的直流电阻值, Ω ;

亦可采用直流电阻测量仪进行线路直流电阻测量。当被测线路较短时, 测量结果应减去测量引线的直流电阻值。

6.2 直流电阻的折算

直流电阻的测量过程中应记录被测线路两端及沿线的温度。根据测量记录的温度, 按照式(3)将A相的直流电阻值 R_A 折算至20℃的直流电阻 $R_{A,20^\circ\text{C}}$:

$$R_{A,20^\circ\text{C}} = \frac{R_A}{1 + (t - 20)\beta} \quad (3)$$

式中:

t ——线路沿线的平均温度, $^\circ\text{C}$;

β ——被试线路的电阻温升系数, $1/\text{°C}$ 。对于钢芯铝绞线, $\beta=0.003\ 6\ (1/\text{°C})$; 对于铜芯电缆, $\beta=0.003\ 82\ (1/\text{°C})$ 。

$R_{B,20^\circ\text{C}}$ 、 $R_{C,20^\circ\text{C}}$ 测量结果的折算方法同 $R_{A,20^\circ\text{C}}$ 。

7 单回交流线路指定频率点的电气参数测量与计算

7.1 总则

7.1.1 测量单回交流输电线路各指定频率点的三相正序短路阻抗和开路阻抗、三相零序短路阻抗和开路阻抗, 以获取线路对应频率点的单位长度电阻、电感、对地电容值, 以及相间耦合电感、耦合电容值。

7.1.2 短路阻抗和开路阻抗测量过程中, 宜使外施电源的输出电压或电流达到额定值, 以提高信噪比。

7.1.3 单回交流线路的正序参数测量应使用三相对称交流电源。测量过程中, 电源的中性点应工作接地。

7.2 单回交流线路指定频率点的交流电气参数测量

7.2.1 单回交流线路正序短路阻抗的测量与计算

如图7所示, 将单回三相线路的末端短路, 在首端施加频率为 f 的三相正序电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的三相电压相量 $\dot{U}_{SI} = [\dot{U}_{SI,A} \ \dot{U}_{SI,B} \ \dot{U}_{SI,C}]$, 三相电流相量 $\dot{I}_{SI} = [\dot{I}_{SI,A} \ \dot{I}_{SI,B} \ \dot{I}_{SI,C}]$, 则正序短路阻抗 Z_{SI} 为:

$$Z_{SI} = \frac{\mathbf{a}\dot{U}_{SI}^T}{\mathbf{a}\dot{I}_{SI}^T} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{a} = \frac{1}{3}[1 \ \alpha \ \alpha^2]$, $\alpha = e^{j2\pi/3}$ 。

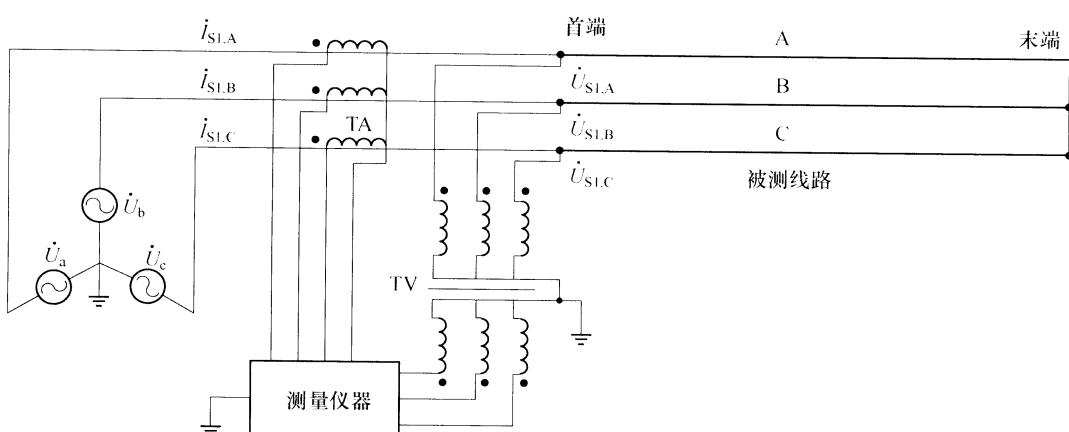


图7 单回交流线路正序短路阻抗测量

7.2.2 单回交流线路正序开路阻抗的测量与计算

如图 8 所示, 将单回三相线路的末端开路, 在首端施加频率为 f 的三相正序电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的三相电压相量 $\dot{U}_{\text{OI}} = [\dot{U}_{\text{OI,A}} \quad \dot{U}_{\text{OI,B}} \quad \dot{U}_{\text{OI,C}}]$, 三相电流相量 $\dot{I}_{\text{OI}} = [\dot{I}_{\text{OI,A}} \quad \dot{I}_{\text{OI,B}} \quad \dot{I}_{\text{OI,C}}]$, 则正序开路阻抗 Z_{OI} 为:

$$Z_{\text{OI}} = \frac{\mathbf{a} \dot{U}_{\text{OI}}^T}{\mathbf{a} \dot{I}_{\text{OI}}} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{a} = \frac{1}{3}[1 \quad a \quad a^2]$, $a = e^{j2\pi/3}$ 。

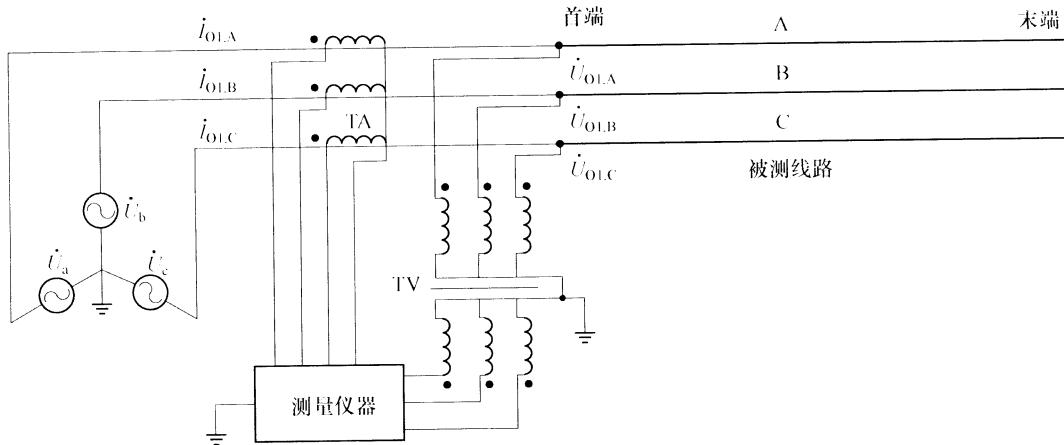


图 8 单回交流线路正序开路阻抗测量

7.2.3 单回交流线路零序短路阻抗的测量与计算

如图 9 所示, 将单回三相线路的末端短路并接地, 三相线路的首端并联, 在首端与接地装置之间施加频率为 f 的单相电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的电压相量 \dot{U}_{S0} 、电流相量 \dot{I}_{S0} , 则零序短路阻抗 Z_{S0} 为:

$$Z_{\text{S0}} = \frac{\dot{U}_{\text{S0}}}{\dot{I}_{\text{S0}}/3} \quad (6)$$

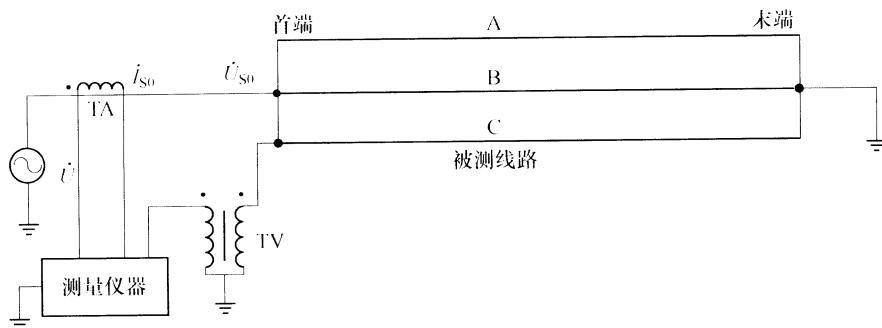


图 9 单回交流线路零序短路阻抗测量

7.2.4 单回交流线路零序开路阻抗的测量与计算

如图 10 所示, 将单回三相线路的末端悬空, 三相线路的首端并联, 在首端与接地装置之间施加频率为 f 的单相电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的电压相量 \dot{U}_{O0} 、电流相量 \dot{I}_{O0} , 则零序开路阻抗 Z_{O0} 为:

$$Z_{\text{O0}} = \frac{\dot{U}_{\text{O0}}}{\dot{I}_{\text{O0}}/3} \quad (7)$$

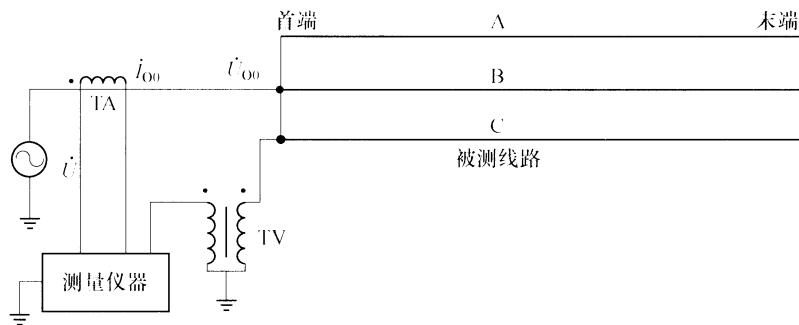


图 10 单回交流线路零序开路阻抗测量

7.3 单回交流线路指定频率点的单位长度电气参数计算

7.3.1 指定频率点的单位长度参数计算应遵循的原则

指定频率点的单位长度参数计算应遵循下列原则：

- 同一序分量的开路阻抗和短路阻抗测量结果参与同一序分量的单位长度电气参数计算。如单回线路三相正序开路阻抗和单回线路三相正序短路阻抗测量结果才可参与单回线路单位长度的正序参数计算。
- 同一频率下的开路阻抗和短路阻抗测量结果参与同一频率下单位长度电气参数的计算。如同为 $f_s - \Delta f$ 频率下正序开路阻抗和正序短路阻抗测量结果才可参与计算 $f_s - \Delta f$ 频率下单位长度的正序参数。

7.3.2 指定测量频率点单位长度参数的计算

通过本标准 7.2 获得指定频率 f 的输电线路正序开路阻抗 Z_{01} 和正序短路阻抗 Z_{S1} 、零序开路阻抗 Z_{00} 和短路阻抗 Z_{S0} 后，按照表 1 的流程和公式计算该频率下单位长度的电气参数。

表 1 单回交流线路指定频率下单位长度电气参数的计算流程及公式

参数名称	正序参数		零序参数	
原始测量数据 Ω	Z_{01}	Z_{S1}	Z_{00}	Z_{S0}
特征阻抗 Ω	$z_{c,1} = \sqrt{Z_{S1}/Z_{01}}$		$z_{c,0} = \sqrt{Z_{S0}/Z_{00}}$	
传播系数 $1/km$	$\gamma_1 = \frac{\text{arc coth } \sqrt{Z_{01}/Z_{S1}}}{D}$		$\gamma_0 = \frac{\text{arc coth } \sqrt{Z_{00}/Z_{S0}}}{D}$	
单位长度的阻抗 Ω/km	$z_1 = z_{c,1}\gamma_1$		$z_0 = z_{c,0}\gamma_0$	
单位长度的导纳 S/km	$y_1 = \gamma_1/z_{c,1}$		$y_0 = \gamma_0/z_{c,0}$	
单相导线的电阻 Ω/km			$r = \text{Re}(z_1)$	
单相导线的自电感 mH/km			$I = \frac{\text{Im}(z_0 + 2z_1)}{3(2\pi f)} \times 10^3$	
单相导线的对地电容 pF/km			$c_0 = \frac{\text{Im}(z_0)}{3(2\pi f)} \times 10^{12}$	
相间耦合电感 mH/km			$m = \frac{\text{Im}(z_0 - z_1)}{3(2\pi f)} \times 10^3$	

表 1 (续)

参数名称	正序参数	零序参数
相间耦合电容 pF/km		$c_m = \frac{\text{Im}(y_1 - y_0)}{3(2\pi f)} \times 10^{12}$
大地电阻 Ω/km		$r_g = \frac{\text{Re}(z_0 - z_1)}{3}$

8 同塔双回线路间指定频率点的耦合参数测量与计算

8.1 总则

8.1.1 同塔双回线路间耦合参数的测量原理，主要应用到两相交流系统及其对称分量法。两相交流系统及其对称分量法参见附录 A。

8.1.2 测量同塔双回线路指定频率点的两相正序短路阻抗和开路阻抗、两相零序短路阻抗和开路阻抗，以获取该频率点双回线路间的耦合电感、耦合电容值；

8.1.3 同塔双回线路指定频率点的两相正序短路阻抗和正序开路阻抗测量应使用幅值相等、相位互差 180°的两相对称交流电源。测量过程中，电源的中性点应工作接地。

8.1.4 短路阻抗和开路阻抗测量过程中，宜使外施测量电源的电压或电流达到额定输出值，以提高信噪比。

8.1.5 长距离同塔双回线路间的耦合参数，应采用本标准 8.2 和 8.3 所述的方法进行测量和计算。短距离同塔双回线路间的耦合参数，可采用本标准 8.4 所述的方法进行测量和计算。短距离线路参数的快速算法参见附录 B。

8.2 同塔双回线路间的交流电气参数测量与计算

8.2.1 同塔双回线路间两相正序短路阻抗测量与计算

如图 11 所示，将 I、II 回线路首端三相导线各自短接，I、II 回线路的末端全部短接，在首端线路 I 回和 II 回之间施加频率为 f 的两相正序电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的两相电压相量 $\mathbf{U}_{SI, I-II} = [\dot{U}_{SI,I} \quad \dot{U}_{SI,II}]$ ，两相电流相量 $\mathbf{I}_{SI, I-II} = [i_{SI,I} \quad i_{SI,II}]$ ，则双回线路的两相正序短路阻抗 $Z_{SI, I-II}$ 为：

$$Z_{SI, I-II} = \frac{\mathbf{b}\mathbf{U}_{SI, I-II}^T}{\mathbf{b}\mathbf{I}_{SI, I-II}^T} \quad (8)$$

其中： $\mathbf{b} = \frac{1}{2} [1 \quad -1]$ 。

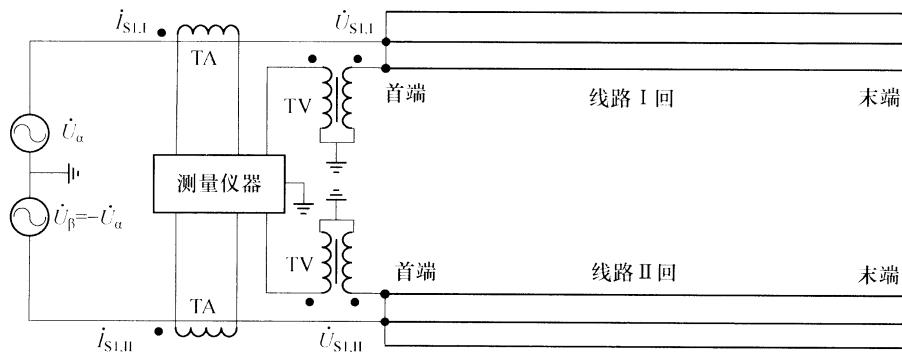


图 11 同塔双回线路两相正序短路阻抗测量

8.2.2 同塔双回线路间两相正序开路阻抗的测量与计算

如图 12 所示，将 I、II 回线路的首端三相导线三相各自短接，I、II 回线路的末端全部开路，在

首端线路 I 回和 II 回之间施加频率为 f 的两相正序电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的两相电压相量 $\mathbf{U}_{\text{OI}, \text{I-II}} = [\dot{U}_{\text{OI,I}} \quad \dot{U}_{\text{OI,II}}]$ ，两相电流相量 $\mathbf{I}_{\text{OI,I-II}} = [\dot{I}_{\text{OI,I}} \quad \dot{I}_{\text{OI,II}}]$ 。则双回线路的两相正序开路阻抗 $Z_{\text{OI}, \text{I-II}}$ 为：

$$Z_{O_l, \text{I-II}} = \frac{\mathbf{b}U_{O_l, \text{I-II}}^T}{\mathbf{b}I_{O_l, \text{I-II}}^T} \quad (9)$$

其中: $b = \frac{1}{2} [1 \quad -1]$ 。

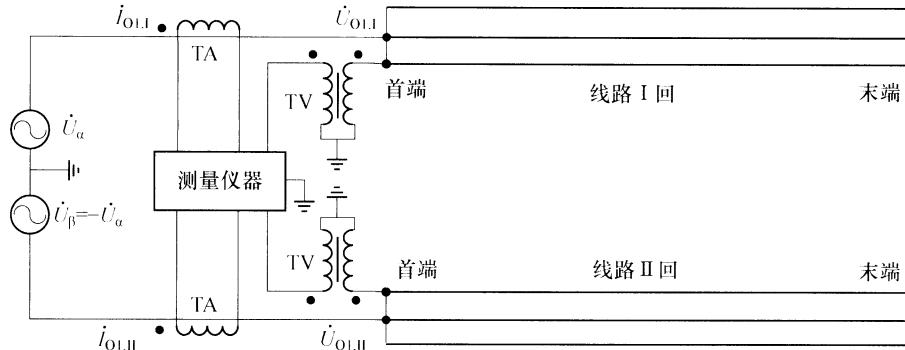


图 12 同塔双回线路两相正序开路阻抗测量

8.2.3 同塔双回线路间两相零序短路阻抗测量与计算

如图 13 所示, 将 I、II 回线路的首端短接, I、II 回线路的末端短接并接地, 在 I、II 回线路的首端与接地装置之间施加频率为 f 的单相电源。在 I、II 回线路首端测量并通过信号分析提取该频率的电压相量 $\dot{U}_{S_0, I-II}$, 电流相量 $\dot{i}_{S_0, I-II}$, 则双回线路的两相零序短路阻抗 $Z_{S_1, I-II}$ 为:

$$Z_{S0, \text{ I-II}} = \frac{\dot{U}_{S0, \text{ I-II}}}{\dot{i}_{S0, \text{ I-II}}/2} \quad (10)$$

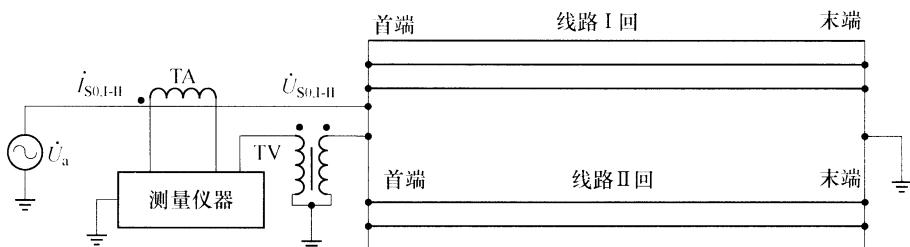


图 13 同塔双回线路两相零序短路阻抗测量

8.2.4 同塔双回线路间两相零序开路阻抗的测量与计算

如图 14 所示, 将 I、II 回线路的首端短接, I、II 回线路的末端开路(悬空)。在 I、II 回线路的首端与接地装置之间施加频率为 f 的单相电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率的电压相量 $\dot{U}_{00_{-I+II}}$, 电流相量 $\dot{i}_{00_{-I+II}}$ 。则双回线路的两相零序开路阻抗 $Z_{00_{-I+II}}$ 为:

$$Z_{O0, \text{ I-II}} = \frac{\dot{U}_{O0, \text{ I-II}}}{\dot{I}_{O0, \text{ I-II}}/2} \quad (11)$$

8.3 同塔双回线路间指定频率下的单位长度耦合参数计算

通过本标准 8.2 获得指定频率 f 下双回线路间的两相正序开路阻抗 $Z_{O1, I-II}$ 和正序短路阻抗 $Z_{S1, I-II}$ 、两相零序开路阻抗 $Z_{O0, I-II}$ 和短路阻抗 $Z_{S0,I-II}$ 后，按照表 2 的流程和公式计算该频率下同塔双回线路间单位长度的耦合参数。

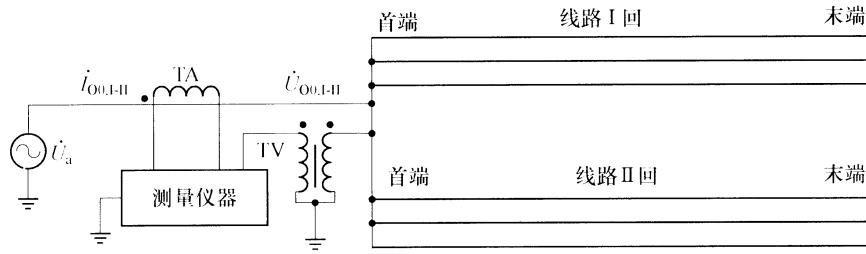


图 14 同塔双回线路两相零序开路阻抗测量

表 2 同塔双回线路指定频率下单位长度耦合参数的计算流程及公式

参数名称	正序参数		零序参数	
原始测量数据 Ω	$Z_{O1, 1-II}$	$Z_{S1, 1-II}$	$Z_{O0, 1-II}$	$Z_{S0, 1-II}$
特征阻抗 Ω	$z_{c,1} = \sqrt{Z_{O1, 1-II} \cdot Z_{S1, 1-II}}$		$z_{c,0} = \sqrt{Z_{O0, 1-II} \cdot Z_{S0, 1-II}}$	
传播系数 1/km	$\gamma_1 = \frac{\operatorname{arc coth} \sqrt{Z_{O1, 1-II}/Z_{S1, 1-II}}}{D}$		$\gamma_0 = \frac{\operatorname{arc coth} \sqrt{Z_{O0, 1-II}/Z_{S0, 1-II}}}{D}$	
单位长度的阻抗 Ω/km	$z_1 = z_{c,1} \gamma_1$		$z_0 = z_{c,0} \gamma_0$	
单位长度的导纳 S/km	$y_1 = \gamma_1/z_{c,1}$		$y_0 = \gamma_0/z_{c,0}$	
双回线路间的耦合电感 mH/km		$m_{1-II} = \frac{\operatorname{Im}(z_0 - z_1)}{2(2\pi f)} \times 10^3$		
双回线路间的耦合电容 pF/km		$c_{1-II} = \frac{\operatorname{Im}(y_1 - y_0)}{2(2\pi f)} \times 10^{12}$		

8.4 短距离同塔双回输电线路间耦合参数的测量与计算

8.4.1 短距离同塔双回输电线路间耦合电容的测量与计算

如图 15 所示, 将 I、II 回线路的首端分别三相短接, I、II 回线路的末端路开路(悬空), 在线路 I 首端与接地装置之间施加频率为 f 的单相电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率下线路 I 的电压相量 \dot{U} 及线路 II 的电流相量 i , 双回线路间单位长度耦合电容值 c_{1-II} 为:

$$c_{1-II} = \operatorname{Im}\left(\frac{i}{2\pi f \dot{U} D}\right) \quad (12)$$

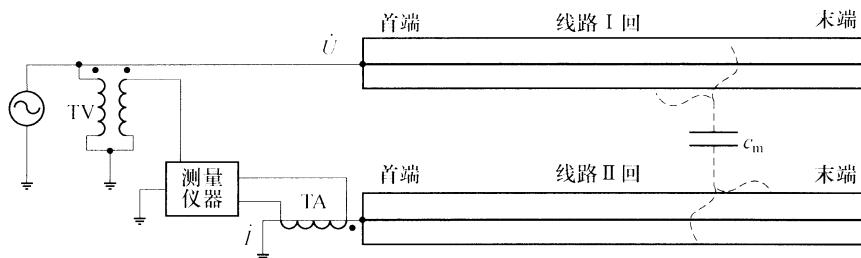


图 15 短距离同塔双回线路间耦合电容的测量

8.4.2 短距离同塔双回输电线路之间耦合电感的测量

如图 16 所示, 将 I、II 回线路的首端分别三相短接, I、II 回线路的末端短路接地, 在线路 I 首

端与接地装置之间施加频率为 f 的单相电源。在首端测量并通过信号分析提取该频率下线路 I 的电流相量 i ，线路 II 首端的电压相量 \dot{U} ，双回线路间单位长度的耦合电感 $m_{\text{I-II}}$ 为：

$$m_{\text{I-II}} = \text{Im} \left(\frac{\dot{U}}{2\pi f i D} \right) \quad (13)$$

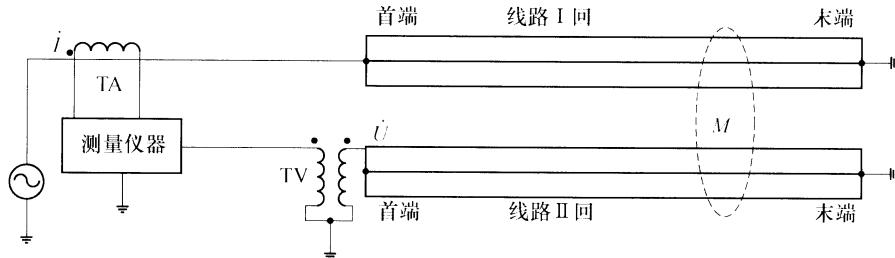


图 16 短距离同塔双回线路间耦合电感的测量

9 异频测量数据的处理分析

9.1 异频信号测量条件下线路单位长度工频参数的计算

在获得 $f_s - \Delta f$ 及 $f_s + \Delta f$ 两个频率点的单位长度电气参数后，工频分量下各单位长度的电气参数参照表 3 进行计算。

表 3 单位长度工频参数计算

单位长度参数	频 率		
	$f_s - \Delta f$	$f_s + \Delta f$	f_s
单位长度的正序阻抗 Ω/km	$z_1(f_s - \Delta f)$	$z_1(f_s + \Delta f)$	$z_1(f_s) = \left[\frac{z_1(f_s - \Delta f)}{f_s - \Delta f} + \frac{z_1(f_s + \Delta f)}{f_s + \Delta f} \right] \times \frac{f_s}{2}$
单位长度的正序导纳 S/km	$y_1(f_s - \Delta f)$	$y_1(f_s + \Delta f)$	$y_1(f_s) = \left[\frac{y_1(f_s - \Delta f)}{f_s - \Delta f} + \frac{y_1(f_s + \Delta f)}{f_s + \Delta f} \right] \times \frac{f_s}{2}$
单位长度的零序阻抗 Ω/km	$z_0(f_s - \Delta f)$	$z_0(f_s + \Delta f)$	$z_0(f_s) = \left[\frac{z_0(f_s - \Delta f)}{f_s - \Delta f} + \frac{z_0(f_s + \Delta f)}{f_s + \Delta f} \right] \times \frac{f_s}{2}$
单位长度的零序导纳 S/km	$y_0(f_s - \Delta f)$	$y_0(f_s + \Delta f)$	$y_0(f_s) = \left[\frac{y_0(f_s - \Delta f)}{f_s - \Delta f} + \frac{y_0(f_s + \Delta f)}{f_s + \Delta f} \right] \times \frac{f_s}{2}$

9.2 工频下线路的特征阻抗和传播系数计算

通过同一序分量下工频单位长度阻抗和单位长度导纳计算该序量下工频特征阻抗 $z_{c,i}(f_s)$ 和传播系数 $\gamma_i(f_s)$ 为：

$$z_{c,i}(f_s) = \sqrt{z_i(f_s)/y_i(f_s)}, \quad i=0, 1 \quad (14)$$

$$\gamma_i(f_s) = \sqrt{z_i(f_s) \cdot y_i(f_s)}, \quad i=0, 1 \quad (15)$$

9.3 线路工频等值电路参数计算

通过同一序分量的工频特征阻抗 $z_{c,i}(f_s)$ 和传播系数 $\gamma_i(f_s)$ ，计算该序量下工频 Π 型等值电路（见图 17）参数 Z'_i 和 Y'_i 为：

$$Z'_i = z_{c,i}(f_s) \cdot \sinh[\gamma_i(f_s)D], \quad i=0, 1 \quad (16)$$

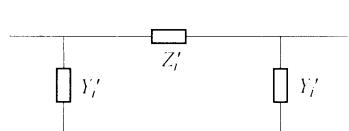


图 17 线路的 Π 形等值电路

$$Y'_i = \frac{\cosh[\gamma_i(f_s) \cdot D] - 1}{z_{c,i}(f_s) \cdot \sinh[\gamma_i(f_s) \cdot D]}, \quad i=0, 1 \quad (17)$$

10 测量中的注意事项

10.1 安全注意事项

10.1.1 测量过程中，被测线路及变电站内相关设备的试验、操作及登高作业应严格遵守 GB 26860 和 GB 26859 的相关规定。

10.1.2 测量人员应使用绝缘鞋、绝缘手套、绝缘垫及其他防护手段。

10.1.3 在测量期间应密切关注沿线的气象活动情况。若测量现场及沿线有雨、雪、雷电活动时应停止测量。

10.1.4 测量接线及变更接线工作应在被测线路两端均接地的情况下进行，防止感应电压触电。

10.1.5 为防止测量过程中被测线路遭受突发性雷击，宜在测量引线与接地装置之间装设放电间隙或者避雷器，保障人身与设备的安全。

10.1.6 如果感应电压和感应电流水平较高，危及人身和设备安全，应采取措施降低其影响，直至满足安全要求。

10.2 温度、湿度记录

测量时应记录被测线路两端以及沿线的温度、湿度等气候条件，以便对电阻、电容的测量结果进行校正。

10.3 试验设备与测量仪器

试验设备与测量仪器应满足附录 C 的规定。

10.4 电压测量引线

电压测量信号应从被测线路端部用专门的电压信号线接入测量仪器，不应直接在电源设备的出口测量电压信号，以消除引线电压降的影响。

10.5 接地

测量正序参数时试验电源的中性点应工作接地。

工作接地和保护接地应使用变电站的接地网，不得使用线路杆塔的接地装置；不能直接接在复合光缆架空地线（OPGW）的接地引线。

10.6 末端短接线

高电压等级线路相间距离较大，在进行线路末端短路（含短路接地）项目的测量时，宜利用线路末端的接地开关和引下线。对于采用临时短接线的情况，应注意在测量结果中消除临时短接线阻抗的影响。

附录 A
(资料性附录)
两相交流系统及其对称分量法

A.1 两相接地系统

为获取同塔双回输电线路之间单位长度的耦合电感、单位长度的耦合电容，可将同塔双回输电线路视作两相系统。

两相系统中如各相的阻抗相等，且两相电压幅值相等，两相电压之间的相角互差 180° ，即：

$$\dot{U}_A = U \angle \varphi_A \quad (A.1)$$

$$\dot{U}_B = U \angle (\varphi_A - \pi) \quad (A.2)$$

则称为两相对称系统。中性点接地的两相交流系统见图 A.1。

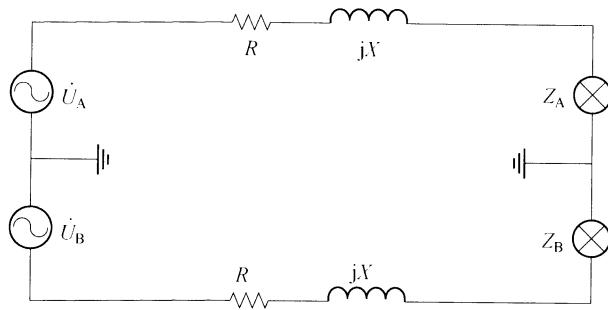


图 A.1 两相接地系统

A.2 两相系统的对称分量法

不对称的两相系统（如电源不对称，或者两相阻抗不相等），可分解为两个对称的两相系统，即两相正序系统（见图 A.2）和两相零序系统（见图 A.3）。电压和电流的序分量与相分量之间的变换关系如下：

a) 电压序分量与相分量的变换关系。

两相系统中，两相正序电压 \dot{U}_1 和两相零序电压 \dot{U}_0 与两相电压 \dot{U}_A 和 \dot{U}_B 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \end{bmatrix} \quad (A.3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \end{bmatrix} \quad (A.4)$$

b) 电流序分量与相分量的变换关系。

两相系统中，两相正序电流 \dot{i}_1 和两相零序电流 \dot{i}_0 与两相电流 i_A 和 i_B 之间的关系为：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_0 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} \quad (A.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_0 \\ \dot{i}_1 \end{bmatrix} \quad (A.6)$$

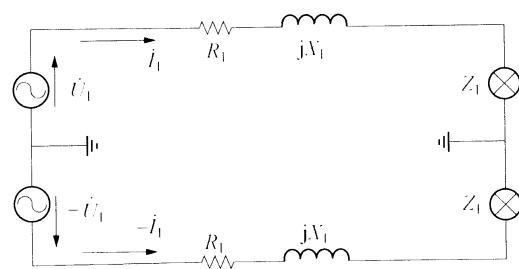


图 A.2 两相正序等值电路

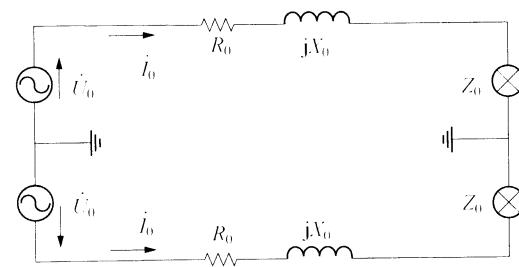


图 A.3 两相零序等值电路

附录 B
(资料性附录)
短距离输电线路参数的快速算法

B.1 对于短距离的输电线路，可以采用本附录的快速算法计算参数。

注：500kV 电压等级，100km 以下的架空线路可视作短距离线路。不同电压等级下，短距离的量值不尽一致；紧凑型架空输电线路产生分布效应的距离比普通架空线路短；电缆线路产生分布效应的距离是架空线路的 1/3。

B.2 等值电路参数的阻抗

对于短距离输电线路，短路阻抗测量值 Z' 可视作等值 Π 型电路的串联阻抗 Z_d ，即：

$$Z' = Z_d \quad (\text{B.1})$$

等值 π 型电路的并联导纳 Y' 可视作开路阻抗测量值 Z_k 倒数的一半，即：

$$Y' = \frac{1}{2Z_k} \quad (\text{B.2})$$

B.3 单位长度的线路参数

对于短距离输电线路，单位长度的线路阻抗 z 可以近似为：

$$z = Z_d / D \quad (\text{B.3})$$

单位长度的并联导纳 y 为：

$$y = \frac{1}{Z_k D} \quad (\text{B.4})$$

其中 D 为线路的长度（km）。

附录 C
(规范性附录)
试验设备与测量仪器

C.1 试验设备的选取原则

为保证测量精度, 测量前宜估算被测线路的工频参数, 并根据临近线路的状态估算感应电压及潜供电流的大小, 根据估算结果选择测量所需的合适设备。

C.2 电流互感器

电流互感器应具备良好的幅频特性和相频特性, 电流幅值变换的准确度不低于 0.2%, 相位变换准确度不低于 0.1°。

C.3 电压互感器

电压互感器应具备良好的幅频特性和相频特性, 电压幅值变换的准确度不低于 0.2%。相位变换准确度不低于 0.1°。

C.4 输电线路工频参数测试仪及算法要求

输电线路工频参数测试仪及算法应符合下列要求:

- a) 工频参数测试仪应具备三相电压信号和三相电流信号同步采样分析的功能。
- b) 电压测量系统测量幅值的总不确定度不超过±3%, 测量相位的总不确定度不超过 0.1°。
- c) 电流测量系统测量幅值的总不确定度不超过±3%, 测量相位的总不确定度不超过 0.1°。
- d) 对采用 FFT 进行电压信号和电流信号分析的系统, 信号分析系统的频率分辨率不大于 2.5Hz; 信号幅值测量分析的准确度不低于 0.1%, 信号相位分辨的准确度不低于 0.05°。信号分析系统应具备良好的抗混叠和泄漏功能, 以消除工频感应电流和电压的影响。
- e) 工频参数测试仪如带有线路的参数计算功能, 参数计算部分应该执行本标准的算法。

C.5 交流试验电源

试验电源应具备单一频率正弦波信号输出的能力, 总畸变率小于 3%, 频率稳定且在工频频率附近范围内可调。三相输出电压的不平衡度小于 1%, 且可以根据测量要求组成两相对称的电源输出。

为最大限度减少信号分析中的混叠和泄漏带来的分析误差, 在使用异频法进行测量时, 电源发射的异频信号应能跟踪工频干扰信号, 使得在同一采样窗口内, 能够覆盖完整的电源异频信号周期, 同时覆盖完整的工频干扰信号周期。

试验电源应标明耐受工频感应电压和工频感应电流的能力。

C.6 直流电阻的测量用设备

测量用直流电源可选用多节蓄电池串联。

测量用的直流电压表和直流电流表的精度等级应达到 0.5 级。

测量用的直流电阻测量仪精度等级应达到 0.2 级。