

四端网络参数自动测试系统

张 佳 峰

(应用物理系)

摘 要

本测试系统通过测量可逆对称四端网络输出端开路 and 短路时的输入阻抗 Z_L 和 Z_k ,求得网络的 A 参数和特性阻抗 Z_0 .简略地讨论了系统的硬件、软件和测量误差,系统稍经改动,可测量其它四端网络参数.

一、引 言

在计算机控制输配电网络模拟试验中(用集中参数四端网络模拟高压远距离输电线),需要50Hz至500Hz频段内大信号下的网络参数,若用传统方法测试,既费工、费时,精度又差.本系统是为因此而设计的.在输入测试要求后,整个测量过程,测量数据的处理和输出均由计算机控制.

二、测量原理

高压远距离输电线既满足均匀线方程(电报方程),也满足四端网络 A 方程^[1]

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = a_{11}\dot{U}_2 + a_{12}\dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = a_{21}\dot{U}_2 + a_{22}\dot{I}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 、 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 分别是四端网络输入端和输出端的电压和电流由可逆对称性知:

$a_{11} = a_{22}$ 、 $a_{11}^2 - a_{12}a_{21} = 1$,故只有两个独立的 A 参数.

依定义,输出端开路时的输入阻抗

$$Z_L = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 | \dot{I}_2 = 0$$

输出端短路时的输入阻抗为

$$Z_k = \dot{U}_1 / \dot{I}_1 | \dot{U}_2 = 0 \quad (2)$$

则可得

$$a_{11} = \sqrt{\frac{Z_L}{(Z_L - Z_k)}}, \quad a_{12} = Z_k \sqrt{\frac{Z_L}{(Z_L - Z_k)}}, \quad a_{21} = \frac{1}{Z_L} \sqrt{\frac{Z_L}{(Z_L - Z_k)}}$$

本文1987年3月27日收到.

$$Z_w = \sqrt{Z_L \cdot Z_k} \quad (3)$$

三、系 统 简 介

1. 测量 Z_L 和 Z_k 的方法有多种。为减少测量误差,降低对信号源失真度要求,本系统利用数字转换器对网络输入端电压和电流(在取样电阻上的压降)信号进行采样、转换,通过傅里叶变换求得基频信号的实、虚部,从而求得 Z_L 和 Z_k 。

2. 系统框图如图1所示。其核心是配有IEEE488总线接口的PDP11/23(具有系统控制功能),它通过此总线控制挂在总线上的可编程仪器进行自动测量。

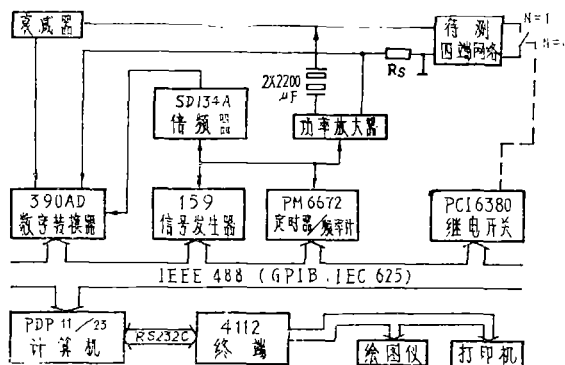


图 1 四端网络参数自动测试系统框图

挂在 IEEE488 总线上的可编程仪器有: (1) 信号发生器159(Wavetex): 提供一定频率和幅度的正弦信号; (2) 数字转换器 390AD(Sony-Tektronix): 对两通道输入信号采样,并转换为数字量; (3) 高精度定时器/频率计 PM 6672 (philips): 测量正弦信号频率; (4) 继电器开关 PCI6380: 控制四端网络输出端负载; (5) 功率放大器 (Crown): 提供大功率正弦信号; (6) 倍频器SD 134 A (Spectral Dynamics Corp.): 对正弦信号倍频,输出作为数字转换器的采样信号; (7) 衰减

器: 衰减输至数字转换器输入端的信号以满足其输入要求; (8) 终端4112 (Tektronix): 与PDP11/23 相配的输入输出设备,且经它与绘图仪、打印机相连接。

3. 软件采用 Tektronix 的 SPS BASIC 语言,它分为四个模块: (1) 测量准备: 以人机对话的形式输入要求测试的频率范围,测试点的频率间隔,测试电压及允许的最大测试电流; (2) 测量: 按要求,测量网络输入端电压和电流; (3) 数据处理: 根据式(2)、(3)求得 Z_L , Z_k , Z_w 及 A 参数; (4) 数据输出: 根据要求,把数据和图表输出给终端显示或供外设打印、绘图以获得硬拷贝。测量模块的逻辑流程图见图2。

4. 输入端信号实、虚部分量的计算公式: 信号为

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \dot{C}_n e^{jn\omega_0 t}$$

式中, $\omega_0 = 2\pi/T_0$ (T_0 为变换周期)。对于时间离散的信号为

$$\dot{C}_n = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \cdot e^{-j(2\pi i/N)n}$$

式中, n 为谐波次数; i 为采样点序号; N 为总采样点数; x_i 为第 i 个采样点采样值。

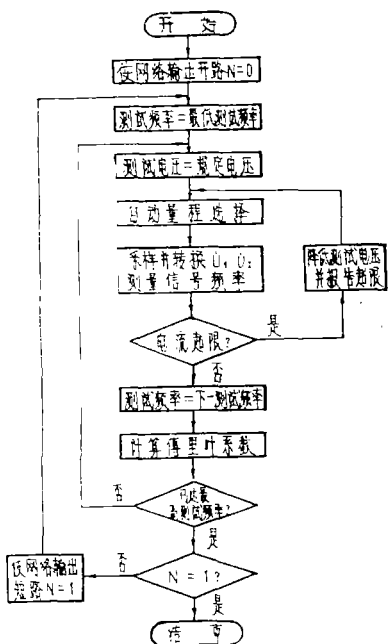


图2 测量模块流程图

在本系统中, 信号经倍频器倍频1024作为数字转换器的采样信号, 在一个采样周期中共采样2048点, 则 $N=2048$, $n=2$ 时

$$C_z = \frac{1}{512} \sum_{i=0}^{1023} x_i e^{-j(\pi/512)i} = R + j \times I$$

考虑到正弦、余弦函数的对称性

$$R = \frac{1}{512} \left[R_0 + \sum_{i=0}^{255} (G_i - H_i) \cdot \cos \frac{\pi}{512} i \right]$$

$$R = -\frac{1}{512} \left[I_0 + \sum_{i=1}^{255} (G_i + H_i) \sin \frac{\pi}{512} i \right] \quad (4)$$

式中, $R_0 = x_0 - x_{512}$; $I_0 = x_{256} - x_{768}$; $G_i = x_i - x_{512+i}$; $H_i = x_{512-i} - x_{1024-i}$.

三、测量误差估算

1. 电流取样电阻 R_I 的电感分量 L_R 的影响: 图3为数字转换器输入端等效电路

$$Z_R = R_I + j\omega L_R$$

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_I} Z_R = \left| \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_I} \right| |Z_R| e^{j(\theta_z + \theta_R)}$$

式中

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{\omega L_R}{R_I}$$

$$\theta_z = \tan^{-1} \left[\frac{I_m(\dot{U}_1/\dot{U}_I)}{\text{Re}(\dot{U}_1/\dot{U}_I)} \right]$$

系统中, $R_I = 2.350\Omega$, $L_R = 2.40\mu\text{H}$ 则

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{\omega L_R}{R_I} \approx \frac{\omega L_R}{R_I} = 6.5 \times 10^{-6} \times f$$

$$Z_{in} = \left| \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_I} \right| |Z_R| e^{j(\theta_z + \theta_R)}$$

$$\cong \left| \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_I} \right| R_I e^{j(\theta_z + 6.5 \times 10^{-6} \times f)} \quad (5)$$

对于 $f=500\text{Hz}$, $\theta_R = 3 \times 10^{-3}\text{rad} = 0.20^\circ$. 在组建系统时, 必须实测 L_R , 以决定修正值.

2. 系统中主要误差源是数字转换器的转换误差. 信号发生器在短时间内的幅度稳定性优于 5×10^{-4} , 频率稳定性优于 10^{-5} , 而校正后的数字转换器的转换相对误差小于 0.4% , 故前两者对总误差的影响可忽略不计.

由式(4)可得

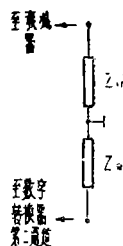


图3 数字转换器两通道输入端等效电路

$$\begin{cases} \Delta R = \frac{1}{512} \sum_{i=0}^{1023} |\Delta x_i \cos \frac{\pi}{512} i| \\ \Delta I = -\frac{1}{512} \sum_{i=0}^{1023} |\Delta x_i \sin \frac{\pi}{512} i| \end{cases} \quad (6)$$

式中 Δx_i 是数字转换器的绝对转换误差。由于输入信号基本上是正弦信号,则

$$x_i = x_0 \sin(\theta_0 + \frac{\pi}{512} i)$$

式中, θ_0 是起始采样点处信号的幅角,在测试中, $\theta_0 = 45^\circ$ 。因而式(5)可写成

$$\begin{aligned} \Delta R &= \frac{\Delta x_0}{x_0} \frac{\sum_{i=0}^{1023} |\sin(\theta_0 + \frac{\pi}{512} i) \cos \frac{\pi}{512} i|}{\sum_{i=0}^{1023} \sin(\theta_0 + \frac{\pi}{512} i) \cos \frac{\pi}{512} i} = \frac{\Delta x_0}{x_0} K_R \\ \Delta I &= -\frac{\Delta x_0}{x_0} \frac{\sum_{i=0}^{1023} |\sin(\theta_0 + \frac{\pi}{512} i) \sin \frac{\pi}{512} i|}{\sum_{i=0}^{1023} \sin(\theta_0 + \frac{\pi}{512} i) \sin \frac{\pi}{512} i} = -\frac{\Delta x_0}{x_0} K_I \end{aligned}$$

式中, $\Delta x_0/x_0 = \Delta x_i/x_i$ 是数字转换器的相对误差。

K_R 、 K_I 与 θ_0 的关系是: $44^\circ \leq \theta_0 \leq 46^\circ$; $K_R, K_I \leq 1.1$; $40^\circ \leq \theta_0 \leq 50^\circ$; $K_R, K_I \leq 1.2$ 。系统中, θ_0 的设定误差可小于 $\pm 1^\circ$,这里取 $K_R = K_I = 1.2$,则

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta I}{I} = 1.2 \times \frac{\Delta x_0}{x_0}$$

对于复数量 \hat{C}

$$\frac{\Delta \hat{C}}{\hat{C}} = \frac{\Delta |\hat{C}|}{|\hat{C}|} + j \Delta \theta = 1.2 \times \frac{\Delta x_0}{x_0} [1 + j]$$

由式(5)得

$$\frac{\Delta Z_{in}}{Z_{in}} = \frac{\Delta Z_L}{Z_L} = \frac{\Delta Z_k}{Z_k} = 2 \times \frac{\Delta |\hat{C}|}{|\hat{C}|} + j \Delta \theta = 1.2 \times \frac{\Delta x_0}{x_0} [2 + j]$$

由式(3)并考虑到测量范围内 $|Z_L| \gg |Z_k|$,则

$$\frac{\Delta a_{11}}{a_{11}} = \frac{\Delta a_{21}}{a_{21}} = -\frac{\Delta Z_w}{Z_w} = \frac{\Delta Z_{in}}{Z_{in}} = \frac{\Delta a_{12}}{a_{12}} = 2 \times \frac{\Delta Z_{in}}{Z_{in}}$$

因而 Z_L 、 Z_k 、 Z_w 、 a_{11} 、 a_{21} 幅值测量误差不大于1%;相角测量误差不大于 0.3° ,
 a_{12} 幅值测量误差不大于2%,相角测量误差不大于 0.6° 。

四、测量结果与结论

1. 为验证系统的测量误差,用此系统测量已知参数的电阻分压网络,RC低通和高通网络输出端开路 and 短路时的输入阻抗 Z_L 和 Z_k 。元件参数为 $R_1 = 218.1 \pm 0.1 \Omega$, $R_2 =$

$100.3 \pm 0.1 \Omega$, $C = 4.167 \pm 0.001 \mu f$. 测量值如下:

(1) 电阻分压网络: 电阻分压网络如图4所示.

$$|Z_L| = 318.3 \pm 0.2 \Omega$$

$$\theta_L = 0.01 \pm 0.04^\circ$$

$$|Z_k| = 217.8 \pm 0.2 \Omega$$

$$\theta_k = 0.04 \pm 0.05^\circ$$

θ_L 、 θ_k 均小于 $\pm 0.1^\circ$, Z_L 、 Z_k 可视为纯电阻, 其值与元件值偏差小于 0.2%.

(2) RC 低通网络: RC 低通网络如图5所示.

$$|Z_k| = 100.1 \pm 0.2 \Omega$$

$$\theta_k = 0.03 \pm 0.04^\circ$$

由 Z_L 求得 $R = 100.4 \pm 0.3 \Omega$, $C = 4.159 \pm 0.1 \mu f$. θ_k 小于 $\pm 0.1^\circ$, Z_k 可视为纯电阻, 阻值偏差小于 0.3%. 而由 Z_L 计得 R , C 与元件值偏差小于 0.3%.

(3) RC 高通网络: RC 高通网络如图6所示. 由 Z_k 求得 $C = 4.152 \pm 0.018 \mu f$, $\theta_k = -89.8 \pm 0.1^\circ$; 由 Z_L 求得 $C = 4.169 \pm 0.012 \mu f$, $R = 100.4 \pm 0.3 \Omega$. 与元件值偏差小于 0.5%, 相角偏差小于 0.3° .

上述数据表明, 用本系统测量网络输入阻抗的误差在上节所估计范围内, 且可推论, 在

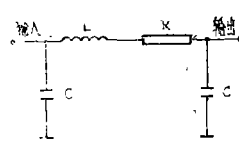
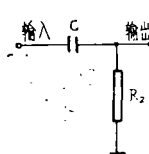
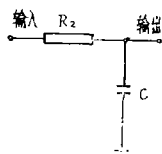
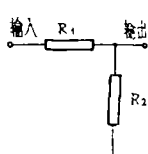


图4 电阻分压网络

图5 RC低通网络

图6 RC高通网络

图7 待测四端网络

满足 $|Z_L| \gg |Z_k|$ 的情况下, 所得网络参数的误差也在技术指标范围内.

2. 系统技术指标: 测试频率范围为 30--2000Hz, 最大测试电压(有效值)是 40V, 最大测试电流(有效值)是 6A. 在 30--500Hz 频率内最大输出功率为 120W, 改变 R_L 可改变最大测试电压.

测量误差: 在 $|Z_L| \gg |Z_k|$ 的情况下, Z_L 、 Z_k 、 Z_w 、 a_{11} 、 a_{21} 幅值不大于 1%, 相角不大于 0.3° ; a_{12} 幅值不大于 2%, 相角不大于 0.6° .

3. 待测集中参数四端网络(模拟高压远距离输电线)示于图7, 一组测量数据列于表1.

4. 本系统由计算机和可编程通用仪器组成, 稍经改动, 可测量其它四端网络参数, 或组成自动频谱分析系统以及幅频特性测试系统等. 由于自动测试系统组建、改建较为方便, 自动测试省工、省时, 重复性好, 精度高, 随着智能仪器的发展必将得到越来越广泛的应用.

装 1 四端网络参数测量值

频率 (Hz)	Z_L 幅值 (Ω)	Z_L 相角 ($^\circ$)	Z_K 幅值 (Ω)	Z_K 相角 ($^\circ$)	Z_W 幅值 (Ω)	Z_W 相角 ($^\circ$)
50	1109	-89.7	1.09	59.1	34.9	-15.3
100	555	-89.8	1.95	73.0	33.0	-8.4
150	364	-89.8	2.91	78.3	32.6	-5.8
200	276	-89.9	3.84	80.8	32.8	-4.6
250	218	-89.9	4.87	82.3	32.9	-3.8
300	182	-89.8	5.89	83.2	33.2	-3.4
350	155	-89.8	6.95	83.9	33.5	-3.1
400	135	-89.8	8.01	84.3	33.9	-2.9
450	119	-89.7	9.15	84.5	34.3	-2.8
500	107	-89.8	10.30	84.7	34.8	-2.8

a_{11} 幅值 a_{11} 相角($^\circ$) a_{12} 幅值(Ω) a_{12} 相角($^\circ$) a_{21} 幅值(mS) a_{21} 相角($^\circ$)

1.00	0.01	1.09	59.1	0.90	89.7
0.00	0.03	1.95	73.1	1.80	89.9
0.99	0.05	2.90	78.3	2.75	89.9
1.00	0.06	3.82	80.8	3.60	90.0
0.98	0.09	4.82	82.4	4.55	89.9
0.99	0.11	5.79	83.3	5.40	89.9
0.97	0.14	6.80	84.0	6.30	90.0
0.98	0.17	7.78	84.4	7.20	90.0
0.96	0.20	8.82	87.7	8.05	89.9
0.96	0.24	9.83	84.9	8.90	90.0

参 考 文 献

- [1] 吴大正主编, 信号和线性网络分析, 人民教育出版社, (1980), 109—111, 136, 204—211.
 [2] Martin Colloms, Computer Controlled Testing and Instrumentation, Pentech press, (1983), 37.

An Automatic Test System for Parameters of Four-Pole Network

Zheng Jiefeng

Abstract

An automatic test system for parameters of four-pole network is discussed briefly in this paper, with respect to its function as well as its hardware, software and the error of measurement.

With this system, the parameters (a_{11} , a_{12} , a_{21} , and wave impedance z_w) of a reversible symmetrical four-pole network can be obtained by measuring the input impedance Z_L and Z_K while the output loading is infinite and zero.

The system, with a little alteration, can also be used to measure other parameters of four-pole network.