[线路参数]

一种输电线路工频序参数的计算方法

文/福建水利电力职业技术学院　陈　婷　朱文强

在双端非同步测量的情况下，利用电压相量与电流相量相除的方法实现了正序参数不受非同步角的影响，利用求解出的正序参数计算出非同步角，最后将非同步角作为已知数代入不对称运行方式下的长线方程中求解出零序参数。仿真验证表明，该方法有效解决了录波器两端采样数据不同步给线路参数计算带来的问题，计算准确度高。

输电线路是电力系统重要的组成部分，输电线路电气等值参数的准确性直接关系到电力系统潮流计算、稳定计算和短路电流计算等方面。随着电力系统的发展，电网结构越来越复杂，电力系统对输电线路等值参数准确性的要求也越来越高。输电线路参数的测量方法常见的有离线测量法和在线测量法。离线测量法需要对被测线路进行停电，难以获得实际工作情况下的线路参数；并且因为需要对被测线路进行停电，容易对系统的正常运行造成影响，甚至可能引发系统振荡。在线测量可以避免因参数测量而停止线路运行给电力系统带来的经济损失，可以较全面反映实际运行情况下的线路参数，因此研究在线测量对电力系统有着实际意义。

在线测量法是根据线路参数的约束关系，利用线路两端记录的数据而计算线路参数的方法。输电线路参数在线测量法，大多是基于线路两端同步采样数据的条件下进行的，目前仅PMU技术可实现相量同步测量，但因其成本较高，难以得到普及。我国大多数220 kV厂站都未安装PMU，而是采用录波器来记录两端数据，不同步问题同样存在。不同步的采样数据会对参数计算、故障测距和保护计算等一系列电力系统分析产生很大影响。因此有必要研究如何在不同步采样条件下获得接近同步采样状态的输电线路参数的计算方法。

输电线路参数

输电线路参数是指表征电力线路电磁特性的一组电路等值参数。包括电阻R、电抗X、电导G和电纳B，各参数的计算方法因线路情况而异。对于理想的电力系统，三相通常是对称的，实际电力系统中常会出现不对称运行情况，为了保证电力系统和各种电气设备的安全运行，必须进行各种不对称故障的分析和计算。对于静止的线路其正序和负序阻抗是相等的，而三相输电线路的零序阻抗是当三相线路流过零电流时每相的等值阻抗，它与正负序阻抗通常是不相等的。

线路参数通常与线路同杆的回路数、线路是否换位等有关，且发生故障时通常不仅有工频分量还有谐波分量及直流分量。本文仅分析基于非同步测量的单回线路，线路全换位的输电线路正

基金项目：2018年三明市引导性科技项目（2018－G－29）

序、负序和零序线路参数。

基于非同步两端数据的输电线路模型

对于220 kV及以上电压等级的输电线路通常属于中远距离输电线路，而此时为了计及沿线的电流、电压变化，必须认为导线的每一长度都具有电阻和电感，而导线间具有电容和电导。即对于中远距离输电线路要考虑采用分布电路模型。如图1所示。

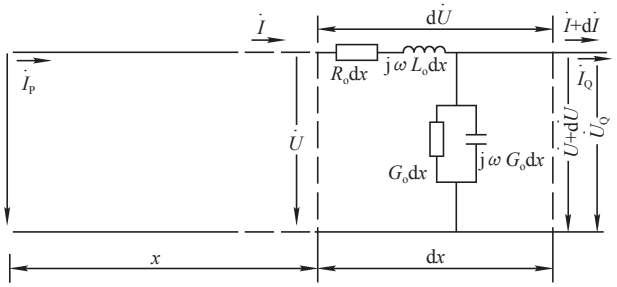

图1　分布参数线路模型

选择分布参数模型作为等值线路，通过解耦用单相的参数模型来表示三相输电线路。

在输电线路正常运行时，对其首末两端的电压相量和电流相量（$\dot{U}_P$，$\dot{U}_Q$和$\dot{I}_P$，$\dot{I}_Q$）进行采样；由于首末采样不同步，导致所得首末两端的电压相量和电流相量出现非同步角，设为θ，根据长线方程稳态解可得

$$\dot{U}_P e^{j\theta} = \dot{U}_Q \cos h(\gamma x) + \dot{I}_Q \sin h(\gamma x) Z_C \quad (1)$$

$$\dot{I}_P e^{j\theta} = \dot{U}_Q \frac{\sin h(\gamma x)}{Z_C} + \dot{I}_Q \cos h(\gamma x) \quad (2)$$

式中，γ为线路传播常数，$\gamma^2 = z_0 y_0$，Z_c为线路波阻抗，$z_c^2 = z_0/y_0$，x为线路长度，且

$$\begin{cases} z_0 = R_0 + jX_0 = R_0 + j\omega L_0 = \gamma Z_C \\ y_0 = G_0 + jB_0 = G_0 + j\omega C_0 = \gamma / Z_C \end{cases} \quad (3)$$

式中，z_0、y_0、R_0、X_0、G_0和B_0分别为线路单位长度的阻抗、导纳、电阻、电抗、电导和电纳。

算法

1．正（负）序参数的计算

本文消除非同步角影响的思路是利用电压相量除以电流相量从而消除非同步角，即式（1）除以式（2）。得方程式（4）

$$\frac{\dot{U}_P e^{j\theta}}{\dot{I}_P e^{j\theta}} = \frac{\dot{U}_P}{\dot{I}_P} = \frac{\dot{U}_Q \cos h(\gamma x) + Z_C \dot{I}_Q \sin h(\gamma x)}{\frac{\sin h(\gamma x)}{Z_C}\dot{U}_Q + \dot{I}_Q \cos h(\gamma x)} \quad (4)$$

正常工作情况下只能获得一个式（4）方程，为能求解出γ、Z_c这两个复数，还需一个复数方程。本文假设线路末端三相短路，得到另一种工作方式下的长线方程组，此方程组与正常运行状态下的式（1）式（2）是相互独立的，即

$$\dot{U}_{PS} e^{j\theta} = Z_C \dot{I}_{QS} \sin h(\gamma x) \quad (5)$$

$$\dot{I}_{PS} e^{j\theta} = \dot{I}_{QS} \cos h(\gamma x) \quad (6)$$

式中，$\dot{U}_{PS}$，$\dot{I}_{PS}$为输电线路末端三相短路状态下，输电线路首端的电压相量与电流相量；

运用上述相同的处理方法，将式（5）除以式（6）消除非同步角θ的影响，得式（7）

$$\frac{\dot{U}_{PS} e^{j\theta}}{\dot{I}_{PS} e^{j\theta}} = \frac{\dot{U}_{PS}}{\dot{I}_{PS}} = Z_C \tan h(\gamma x) \quad (7)$$

联立式（4）式（7）即可得不受非同步角影响的非同步采样数据下线路正序参数的最后计算方程式（8）。式（8）中的电压电流相量均为正序分量，这些量在实际中可以通过录波器测出，仿真时通过傅里叶变换得到各相参数，再通过相序变换得到正序分量。

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_P}{\dot{I}_p} = \frac{\dot{U}_Q \cos h(\gamma x) - Z_C \dot{I}_Q \sin h(\gamma x)}{\frac{\sin h(\gamma x)}{Z_C}\dot{U}_Q - \dot{I}_Q \cos h(\gamma x)} \\ \frac{\dot{U}_{PS}}{\dot{I}_{PS}} = Z_C \tan h(\gamma x) \end{cases} \quad (8)$$

求解非线性方程组式（8）即可获得线路正序参数波阻抗ZC和传播常数γ，对于静止的线路其正序和负序阻抗是相等的,即此处也求出了负序的波阻抗ZC和传播常数γ。

2．非同步角的确定

由于求解正序参数时消去了非同步角的影响，获得了接近真实值的正序参数，将正序参数代入方程式（1）和式（2），即可求得精确的非同步角。

3．零序参数的计算

求解线路零序参数时，需要不对称故障情况下的电压电流零序分量进行求解。本文根据无论在哪种运行状态下非同步角不变的原理，将计算出的非同步角代入非对称运行方式下的传输线方程中即可求出零序线路参数。本文假设在被测线路PQ的邻近线路KP发生不对称故障（本文取单相接地），在本线路产生故障电压电流，来形成故障时的线路方程，如图2所示。在式（1）、式（2）中电压电流相量取零序分量，而非同步角θ又已知，通过解式（1）、式（2）这两个非线性

方程即可算出线路零序参数γ和Z_C。

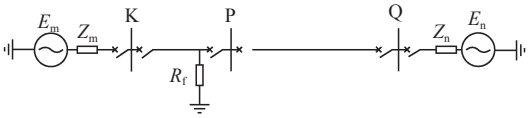

图2　两端输电系统

求解出各序的波阻抗Z_C和传播常数γ，利用方程式（3）即可求得线路的阻抗和导纳。

仿真验证

利用Matlab仿真软件建立模型，如图2所示，并利用软件自带的fsolve函数求解出非线性方程组，得出线路正序、零序的阻抗及导纳理论计算值为

$$\begin{cases} E_1=0.170\,4+\mathrm{j}0.3921\ \Omega/\mathrm{km} \\ Y_1=2.926\,6\times10^{-6}\ \mathrm{s/km} \\ Z_0=0.316+\mathrm{j}1.447\ \Omega/\mathrm{km} \\ Y_0=1.611\times10^{-6}\ \mathrm{s/km} \end{cases} \tag{9}$$

设220 kV架空线路，长度为100 km，端电压为$\dot{U}_P=232\angle0°$，$\dot{U}_Q=232\angle-30°$，因软件仿真测量数据是同步的，人为设置非同步角40°、30°、20°和10°。

存在非同步角和消去非同步角情况下线路正序参数与同步测量结果及相对误差分析见如表1所示；对应不同非同步角计算出的非同步角相对误差如表2所示；假设相邻线路发生单相接地短路情况下计算出的零序参数及相对误差分析如表3所示。

表1　非同步采样下输电线路正序参数计算结果及误差分析

非同步角 / 线路参数	$\theta=40°$	$\theta=30°$	$\theta=20°$	$\theta=10°$	修正	$\theta=0°$（同步测量）
正序电阻/（Ω/km）	0.256 6	0.245 8	0.208 1	0.178 2	0.170 6	0.170 5
相对误差（%）	50.498 5	44.164 2	22.052 8	4.516 1	0.058 7	
正序电抗/（Ω/km）	0.715 1	0.627 6	0.535 4	0.413 9	0.392 2	0.392 1
相对误差（%）	82.376 9	60.061 2	36.546 8	5.559 8	0.025 5	
正序电纳/（10^{-6}s/km）	52.765 1	51.29 30	26.99 90	7.721 9	2.921 5	2.924 5
相对误差（%）	1 704.243 0	1 653.90 70	823.200 5	64.041 7	−0.103 0	

表2　非同步角误差分析

非同步角	$\theta=10°$	$\theta=20°$	$\theta=30°$	$\theta=40°$
θ计算值	$\theta=10.001\,10$	$\theta=20.002\,80$	$\theta=30.007\,30$	$\theta=80.008\,5$
相对误差（%）	0.011	0.014	0.024	0.021

表3　非同步采样下输电线路正序参数计算结果及误差分析

非同步角 / 线路参数	$\theta=40°$	$\theta=30°$	$\theta=20°$	$\theta=10°$	修正	$\theta=0°$（同步测量）
正序电阻/（Ω/km）	0.122 1	0.158 4	0.242 6	0.310 7	0.316 5	0.316 4
相对误差（%）	−61.41	−49.937	−23.325	−1.802	0.031 6	
正序电抗/（Ω/km）	1.521 2	1.486 8	1.476 7	1.454 5	1.558 7	1.548 7
相对误差（%）	−1.776	−3.997	−46.49	−6.083	0.645 7	
正序电纳/（10^{-6}s/km）	17.111 1	15.328 3	10.345 2	3.579 5	1.584 2	1.597 1
相对误差（%）	974.817 8	862.832 9	549.824 1	124.843	−0.808 1	

由表1同步测量值可知，同步测量结果接近理论计算值，说明仿真模型合理。

结束语

1）非同步角的存在将严重影响线路参数的计算，非同步角越大，误差越明显。

2）零序参数计算时涉及非同步角，但因正序参数计算准确度足够高，求解出的非同步角准确度也较高。非同步角的误差较小，采用本方法对零序参数进行计算准确度也足够高。

3）采用本文消去非同步角的方式进行线路参数求解，能将误差控制在1%以内，符合工程要求。EA

（收稿日期：2018.10.06）
（编辑：朱金凤）