用模分量法分析高频输电线路的传输特性

许昌继电器研究所　范五辰

摘要

本文重点介绍了用于电力系统故障计算和高频电流传输特性分析的一种新方法—模分量法的基本概念和特性，又介绍了模分量法在三相电力线载波系统中的特殊应用

一　绪　　论

在现代的高压（220kV及以上）输电线路中，为了保证系统运行的稳性定和可靠性，大都采用了高频保护。高频保护主要是利用输电线路（通道）传输高频电流（讯号）来实现的，所以对高频电流的传输特性进行分析是很有必要的。以前许多书中都曾对这个问题进行过不同程度的论述，但大都用的是对称分量法。对称分量法认为，对于三相线路，在不对称情况下，电磁能量沿输电线的传播是按照所谓正序、负序和零序三种相对独立的“模式”进行的。对于其中任一种模式，三根导线中各处电流电压的幅值和相位具有固定的关系。那么对于任意m根平行导线的输电线系统是否也存在着不同的传输模式？这个问题早在本世纪廿年代已在理论上得到解决。这些年来随着超高压输电线路的兴建，为了节约线路架设费用或由于技术上的困难，出现了不换位的长距离输电线。这种线路三相参数是不对称的。此外，大地电导率的不同以及架空地线的影响也需要比较精确的考虑。同时，为了增加输电容量，常常采用相间距离很近的多回线路并行的输电系统，例如同杆双回线路。在这些情况下各回线之间不仅有零序互感，还有正序和负序互感，这些都使对称分量法的应用遇到很大困难，必须研究新的计算和分析方法。模分量法就是其中之一，在这里向大家作一介绍。

二　基本概念

模分量法目前公认有两种理论，其一可称为“等特性阻抗”模式理论，另一可称之为“等传输常数”模式理论。这里只针对“等特性阻抗”模式理论作简要介绍。

在讨论模分量法基本概念之前，先看几组实验数据，(注：这里输电线路传送高频讯号是采用“相——地”制方式）如下图1（a）、（b）、（c）。

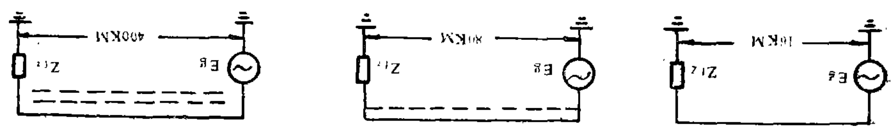


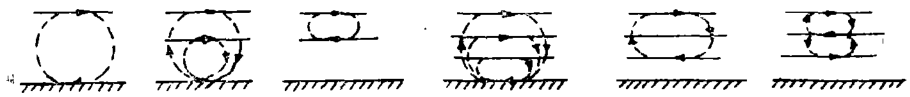
图1（a）　　图1（b）　　图1（c）

（a）单线系统：高频电源和负载接一根导线上，到16Km处功率衰减到1%。

（b）双线系统：把高频电源接在一根导线上，另一根悬空，至80Km处功率衰减到m%。

（c）三线系统：把高频电源接在一根导线上，另二根悬空，至400Km处功率衰减到m%。

实验表明：高频电流的传输不仅与耦合相本身有联系，而且与传输系统的导线根数有关，在不同的导线数目系统中，高频电流具有固定的传输模式，在单线系统中高频电流的传输回路只能是导线与大地，如下图2（a）；在双线系统中高频电流的传输回路则是线与地，线与线两种如图2（b），在三线系统中高频电流的传输回路则又变为：三线与大地、边线与边线、两边线与中相等三种如图2（c）



模3　模3　模2　模3　模2　模1

图2(a)　图2(b)1　图2(b)2　图2(c)1　图2(c)2　图2(c)3

（a）单线系统　（b）双线系统　（c）三线系统

由此可得出如下结论：传输系统的导线根数与传输回路数相同，有几根导线的传输系统，也就有几个传输回路，也就有几个固定的传输模式。每个模式都有固定的阻抗（等特性阻抗））按模式的损耗大小，自小到大排列最小一个叫“模1”，次之叫“模2”，再次之叫“模3”，……

综上所述：用模分量研究高频电流的传输规律的方法，叫模分量法。“等特性阻抗”模式理论是指各导线同一模分量的模电压对模电流之比Z_z都相等，利用“等特性阻抗”模式理论来分析高频输电线路的传输特性是我们的主要任务。

三　高频输电线路传输特性

我们都知道，用对称分量法进行分析时，高频输电线路的传输特性是由波阻抗Z_c（特性阻抗）衰减常数α、相移常数β和波速V等因素来描述的，这些因素又决定于线路分布参数R、L、g、和C等用模分量法来进行分析时，高频输电线路的传输特性除了用波阻抗Z_c，衰减常数α、相移常数β、波速V等因素来描述外，还存在一个模系数问题，下面就进行详细分析。

设有m根平行于地面的半无限长导线组成的传输系统，线路始端正弦电压和电流用向量表示各为$\dot{U}_1, \dot{U}_2, \cdots\cdots, \dot{U}_m$　$\dot{I}_1$，$\dot{I}_2\cdots\cdots$，$\dot{I}_m$假设系统参数是线性的，可有下列关系：

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= Z'_{11}\dot{I}_1 + Z'_{12}\dot{I}_2 + \cdots + Z'_{1m}\dot{I}_m\\ \dot{U}_2 &= Z'_{21}\dot{I}_1 + Z'_{22}\dot{I}_2 + \cdots + Z'_{2m}\dot{I}_m\\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ \dot{U}_m &= Z'_{m1}\dot{I}_1 + Z'_{m2}\dot{I}_2 + \cdots + Z'_{mm}\dot{I}_m\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

式中：Z'_{ii}—从输入端看入的导线i的自阻抗

Z'_{ij}—从输入端看入的导线j对i的互阻抗i、j＝1，2……m

对于半无限长的均匀线路，任何点的Z'_{ii}和Z'_{ij}都相同，等于相应的特性阻抗，写成矩阵式为：

$$[\dot{U}] = [Z'] [\dot{I}] \tag{2}$$

$[\dot{U}]$和$[\dot{I}]$为m维列向量，$[Z']$为m×m对称方阵。

为了说明"等特性阻抗"模式传输的物理意义，可设想将每根导线的电压电流都分成如下的n个模分量，下标1、2……m表示向量序号为正整数下标(1)、(2)……(n)表示模分量序号，为正整数，式子如下：

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_m &= \Sigma \dot{U}_{m(n)} \\ \dot{I}_m &= \Sigma \dot{I}_{m(n)} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

也可表示为：

$$\left.\begin{aligned} [\dot{U}] &= \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{U}_{1(1)} + \dot{U}_{1(2)} + \cdots + \dot{U}_{1(n)} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \dot{U}_{m(1)} + \dot{U}_{m(2)} + \cdots + \dot{U}_{m(n)} \end{pmatrix} \\ [\dot{I}] &= \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{I}_{1(1)} + \dot{I}_{1(2)} + \cdots + \dot{I}_{1(n)} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \dot{I}_{m(1)} + \dot{I}_{m(2)} + \cdots + \dot{I}_{m(n)} \end{pmatrix} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

从同一种分量中提出公因子$\dot{U}_K^{(1)}$，$\dot{U}_k^{(2)}$，…，$\dot{U}_K^{(n)}$后可写成：

$$[\dot{U}] = \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{1(1)} \cdots S_{1(n)} \\ \cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots \\ S_{m(1)} \cdots S_{m(n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{U}_{k(7)} \\ \vdots \\ \dot{U}_{k(n)} \end{pmatrix} = [S] [\dot{U}_k]$$

同理，令 (5)

$$[\dot{I}] = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{S}_{1(1)} \cdots \tilde{S}_{1(n)} \\ \cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots \\ \tilde{S}_{m(1)} \cdots \tilde{S}_{m(n)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_{k(1)} \\ \vdots \\ \dot{I}_{k(n)} \end{pmatrix} = [\tilde{S}] [\dot{I}_k]$$

$\dot{U}_{k(i)}$、$\dot{I}_{k(i)}$，i＝1，2，…，n称为模i电压和模i电流，其比值

$\dot{U}_{k(i)}/\dot{I}_{k(i)} = Z_{(i)}$称为模i特性阻抗。

对于"等特性阻抗模"，同一模i分量各导线的特性阻抗$Z_{C(i)}$应相同，即应有：

$$\frac{\dot{U}_{1(i)}}{\dot{I}_{1(i)}} = \frac{\dot{U}_{2(i)}}{\dot{I}_{2(i)}} = \cdots = \frac{\dot{U}_{m(i)}}{\dot{I}_{m(i)}} = \frac{\dot{U}_{k(i)}}{\dot{I}_{k(i)}} = Z_{C(i)}$$

或 $$\frac{S_{1(i)}\dot{U}_{k(i)}}{\tilde{S}_{1(i)}\dot{I}_{k(i)}} = \frac{S_{2(i)}\dot{U}_{k(i)}}{\tilde{S}_{2(i)}\dot{I}_{k(i)}} = \cdots = \frac{S_{m(i)}\dot{U}_{k(i)}}{\tilde{S}_{m(i)}\dot{I}_{k(i)}} = \frac{\dot{U}_{k(i)}}{\dot{I}_{k(i)}} = Z_{C(i)}$$

因此（5）式的〔$\dot{U}$〕可写成：

$$
[\dot{U}]=\begin{pmatrix}\dot{U}_1\\ \vdots\\ \dot{U}_m\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}Z_{C(1)}\dot{I}_{1(1)}+Z_{C(2)}\dot{I}_{1(2)}+\cdots+Z_{C(n)}\dot{I}_{1(n)}\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ Z_{C(1)}\dot{I}_{m(1)}+Z_{C(2)}\dot{I}_{m(2)}+\cdots+Z_{C(n)}\dot{I}_{m(n)}\end{pmatrix}
$$

$$
=\begin{pmatrix}Z_{C(1)}\dot{I}_{k(1)}\tilde{S}_{1(1)}+Z_{C(2)}\dot{I}_{k(2)}\tilde{S}_{1(2)}+\cdots+Z_{C(n)}\dot{I}_{k(n)}\tilde{S}_{1(n)}\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\ Z_{C(1)}\dot{I}_{k(1)}S_{m(1)}+Z_{C(2)}\dot{I}_{k(2)}\tilde{S}_{m(2)}+\cdots+Z_{C(n)}\dot{I}_{k(n)}\tilde{S}_{m(n)}\end{pmatrix}
$$

$$
=\begin{pmatrix}S_{1(1)}\cdots\tilde{S}_{1(n)}\\ \cdots\cdots\cdots\\ \cdots\cdots\cdots\\ S_{m(1)}\cdots\tilde{S}_{m(n)}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}Z_{C(1)}\dot{I}_{k(1)}\\ \vdots\\ Z_{C(n)}\dot{I}_{k(n)}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}S_{1(1)}\cdots S_{1(n)}\\ \cdots\cdots\cdots\\ \cdots\cdots\cdots\\ \tilde{S}_{m(1)}\cdots\tilde{S}_{m(n)}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\dot{U}_{k(1)}\\ \vdots\\ \dot{U}_{k(n)}\end{pmatrix}\quad(6)
$$

比较（6）和（5）的第一式可知必有：

$$[\tilde{S}]=[S]$$

亦即电流和电压应具有相同的“相—模”转换矩阵〔S〕已知相量求模量时可用〔S〕的逆矩阵〔S〕$^{-1}$

$$[\dot{U}_k]=[S]^{-1}[\dot{U}]\;;\quad[\dot{I}_k]=[S]^{-1}[\dot{I}]$$

从（1）式可知，当输电线中只存在模i电压〔$\dot{U}_{(i)}$〕和模i电流〔$\dot{I}_{(i)}$〕时，可以通过解齐次方程得到n个模式的特性阻抗。

通过以上分析可以总结出高频输电线路的传输特性为：

（1）每组模分量都有固定的波阻抗$Z_{C(n)}=\dfrac{\dot{U}_{m(n)}}{\dot{I}_{m(n)}}$，它等于同一相、同一点、同一组的模分量电压与模分量的电流之比且有以下关系：$Z_{C(1)}<Z_{C(2)}<\cdots<Z_{C(n)}$

（2）每组模分量电压、电流都有自己固定的传播速度据有关资料模1的传播速度$V_{(1)}$接近于光速V，模2的传播速度$V_{(2)}$在0.9～0.99V之间模3的传播速度$V_{(3)}$在0.9V左右，注：V——指光速。

（3）每组模分量电压、电流都有固定的传播常数用$\gamma_{(n)}$表示：

$$\gamma_{(n)}=\alpha_{(n)}+j\beta_{(n)}\qquad(7)$$

式中：$\alpha_{(n)}$——模分量幅值衰减常数，

$\beta_{(n)}$——模分量相移常数，

（4）模系数，用P表示中相与边相的“模1”分量的比例，用q表示中相与边相的“模3”分量的比例，一般情况下p在－1.6到－1.9之间，q在1.1到1.3之间。

四　模分量法在三相电力载波系统中的应用

由于等特性阻抗模式理论（模分量法）和对称分量法相似，都可将一多导线与地的

传输系统化成几个相同的“单导线——地”的传输系统求解，所以有很多方便之处，它不仅可用来分析高频电流传输特性，还可用于短路电流的计算，另外还有其它特殊应用，在这里只分析一下它的特殊用法，下面我们用基本模式的简易图示法来进行分析，先看一个具体例子。

假设：（1）各相和各模分量的波阻抗相同

（2）三相中的瞬态电流和模电流同相或相差180°

（3）不考虑频率效应

令P＝－2、q＝1设“模1”分量为x“模2”分量为y“模3”分量为z，则可画出简图如图3（a）、（b）、（c）。

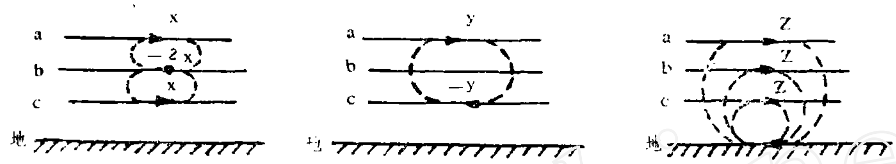


图3（a）“模1”　图3（b）“模2”　图3（c）“模3”

根据简图又可列出简表如表1所示。

从简图和简表中均可得出下列基本关系式：

$$I_a = x + y + z \qquad I_b = -2x + 0 + z$$

$$I_C = x - y + z$$

把以上三个关系式化成方程组如下：

$$\begin{cases} I_a = x + y + z \\ I_b = -2x + 0 + z \\ I_C = x - y + z \end{cases} \tag{8}$$

解此方程组可求得x，y，z

$$\begin{cases} x = \dfrac{1}{6}(I_a - 2I_b + I_C) \\ y = \dfrac{1}{2}(I_a - I_C) \\ z = \dfrac{1}{3}(I_a + I_b + I_C) \end{cases} \tag{9}$$

表1

相＼模	模1	模2	模3
A	1 ⟶ x	⟶ y	1 ⟶ z
B	－2 ⟵ －2x		1 ⟶ z
C	1 ⟶ x	－1 ⟵ －y	1 ⟶ z

以上这种方法就叫简易图示法，因为是针对基本模式而言，所以又叫基本模式简易图示法。

应用此法可以选择最佳偶合相，最佳偶合相主要是通过比较模耦合效率的大小来选择的模耦合效率，可用公式：

$\eta_{(s)} = \dfrac{P_{(s)}}{P_F} \times 100\%$来表示，式中$P_{(s)}$指模功率，$P_F$指发讯功率。举例如下：

针对前面基本模式简图和简表比较A／A和B／B耦合方式的优劣。

对A／A耦合方式，有$U_a=1$，$U_B=U_C=0$因各相和各模分量的波阻抗相同，则模电压分量和模电流分量相同，所以根据式（9）可得出：

$x=\frac{1}{6}$，$y=\frac{1}{2}$，$z=\frac{1}{3}$

模耦合效率$\eta_{(1)}=\frac{1}{6}\times100\%=16.7\%$

对B／B耦合方式，有$U_b=1$，$U_a=U_C=0$，用同样方法可得：

$x=-\frac{1}{3}$，$y=0$，$z=\frac{1}{3}$

模耦合效率$\eta_{(3)}=\frac{1}{3}\times100\%=33.3\%$

$\eta_{(3)}>\eta_{(1)}$所以B／B耦合方式优于A／A耦合方式。

五　换位损耗

以上分析均是针对不换位的长距离输电线而言，对换位的输电线又怎么样呢？见图4所示。

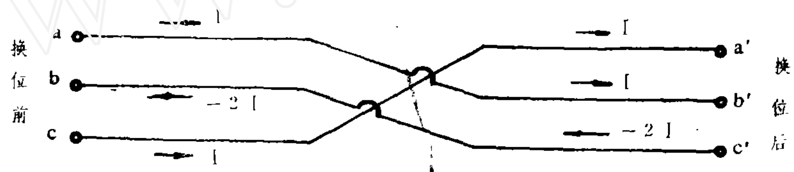


图4

从图中可看出：换位前相量：$I_a=I$，$I_b=-2I$，$I_C=I$，模分量$x=I$，$y=0$，$z=0$；
换位后相量：$I_a'=I$，$I_b'=I$，$I_C'=-2I$，模分量$x'=-\frac{1}{2}I$，$y'=1\frac{1}{2}$，　$z'=0$

由此可以看出换位时存在换位损耗问题，换位损耗不仅与耗合方式有关，还与换位次数也有关，所以把模分量法应用于换位的输电线系统中时，不要遗漏换位损耗问题。

六　结束语

随着科学技术的发展和电子计算机的应用，用于电力系统计算和分析的方法也在不断地被发掘，模分量法只是其中的一种，它并不很完善，还需要我们继续去探索实践。由于本人水平所限，有些想法还不成熟，错误和疏漏之处在所难免，望读者给予批评指正。

参考文献

1．贺家李、葛耀中　超高压输电线故障分析与继电保护
2．华中工学院　电力系统继电保护原理与运行
3．山东工业大学　高压电网继电保护讲义