

# 电力系统三相结构不对称线路的相分量等值电路

梅雪峰

(盐城供电公司, 江苏 盐城 224005)

**摘 要:** 随着现代电力系统的发展, 电力系统元件参数不对称的特性以及系统运行状态导致的不对称越来越突出, 基于系统参数完全对称的对称分量法已经不适用了。随着计算机计算能力的日益提高, 人们对电力系统分析计算不再满足于运算时间上的缩短, 而是追求分析计算的准确度的提高, 电力系统的故障计算的目的已并非仅仅满足规划设计的要求, 而是走向了运行分析, 此时简化已不是计算的目的。在分析了电力系统各元件运行的物理特性的基础上, 提出一种反映系统元件物理实际的相分量等值电路, 反映了元件的实际物理运行特性, 能准确处理各种任意复杂故障类型, 拥有简便、直观、通用的优点, 是一种处理电力系统故障计算与运行分析的实用化方法。

**关键词:** 相分量; 同杆双回线; 节点导纳矩阵; 对称分量法

## 0 引言

随着现代电力系统的发展, 网络参数的不对称性越来越突出, 比如大量高压、超高压输电线路的不换位措施、元件本身结构的不对称、负荷的不对称、运行状态的不对称、以及大量 FACTS 元件引起的网络参数不对称性等等, 再加上计算机计算能力的日益提高, 人们对电力系统分析计算不再满足于运算时间上的缩短, 而是追求分析计算的准确度的提高。使得基于系统参数对称的对称分量法失去了其可行性。人们期待一种新的更准确的计算方法的出现。计及三相不对称元件的分析与计算是十分必要的

传统短路计算的基本假设的目的在于简化计算, 它适用于电气设备选择、保护整定应用的保守要求, 适合电力系统的规划、设计需要<sup>[5]</sup>。但是, 伴随着计算机技术与计算技术的迅猛发展, 电力系统的故障计算的目的已并非仅仅满足规划设计的要求, 而是走向了运行分析, 此时简化已不是计算的目的。在电力系统运行分析中, 各种故障对电力电子设备的正常运行有着明显的影响, 而基于单相等值的对称分量法已不再适用了, 因而电力系统呼唤着电网故障的准确分析方法, 期望着理论方法上的突破。

## 1 单相等值电路的不足

单相计算的假设有: 电力系统三相元件三相参数对称, 且略去元件电阻, 即发电机、变压器、输电线路等都是 ABC 三相对称、相角相差  $120^\circ$ , 且都简化成感性元件。单相等值电路中变压器略去励磁支路而用理想变压器串漏抗 (或  $\pi$  型等值) 表示, 输电线路采用  $\pi$  型等值电路。发电机在潮流计算中, 采用功率表示, 在故障分析计算中用电流源表示<sup>[1-5]</sup>。

单相等值电路是基于系统三相参数完全对称的, 这与现代电力系统三相参数越来越不对称的状况以及运行状况导致的不对称等情况相违背。

下面以一简单模型说明单相等值电路的不足。

双绕组变压器的单相等值电路如下:

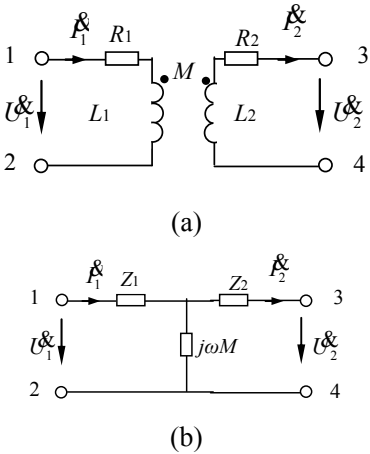


图 1 双绕组变压器的 T 型等值电路  
通常的 T 型等值电路为图 1(b), 图中

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega(L_1 - M) \\ Z_2 = R_2 + j\omega(L_2 - M) \end{cases} \quad (1)$$

实验：拿欧姆表测得 2、4 间存在电位差，即变压器的 T 形等值电路虽可由于 2、4 间等电位的计算，但不能表达变压器的电气特性，这种单相等值模型存在不足。

除此之外，在下面几种情况中，单相等值电路也存在着不足。

①当系统参数不对称时，系统内各个中性点电压不相等也不为零，即存在中性点偏移<sup>[3]</sup>（如图 2 所示），即  $\dot{U}'_N \neq 0$ ，从而  $\dot{U}_N \neq \dot{U}'_N$ ，三相电压不对称，

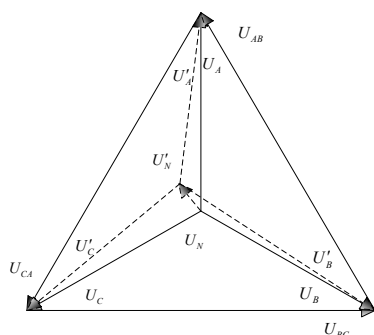


图 2 中性点偏移

这就导致作不出单相等值电路；②变压器用单相等值电路除其本身模型上的不足外，它还不能表达其原副边的相位移，必须做变换才能得到实际相位；③在故障计算中通常略去非故障相的电流，即非故障相开路，这可能会造成远离故障点处的计算电压与实际电压偏移很大。

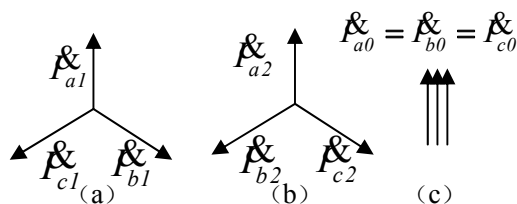
## 2 对称分量法存在的问题

### 2.1 对称分量法的应用

如图 3，对于任意一组不对称的三相电流（或电压），都可以按一定的方法把它们分解成正序、负序和零序三相对称的三相电流（或电压），后者称为前者的对称分量。每一组对称分量都符合：大小相等，彼此之间的相位差相等。正序分量的三相电流大小相等，相位彼此相差  $120^\circ$ ，达到最大值的先后次序是 A—B—C—A；负序分量的三相电流也是大小相等，相位彼此相差  $120^\circ$ ，但达到最大值的先后次序是 A—C—B—A；零序分量三相电流大小相等，相位相同。即：

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{a(0)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{F}_P = T \cdot \dot{F}_S \quad (3)$$



(a) 正序分量；(b) 负序分量；(c) 零序分量

图 3 对称分量法

基于对称分量法的常规故障计算方法首先选定一相作基准相，把相分量转换成序分量，然后根据故障边界条件将正、负和零序网连接成复合序网进

行故障计算，极大的简化了求解过程。

对称分量法在三相静止元件的应用：三相对称阻抗可得解耦的正、负、零三序阻抗。

对称分量法在故障条件的应用：不对称故障可得具有串、并联形式的序分量边界条件。

对称分量法在三相变压器的应用：未采用直接变换方式，而是通过零序电流通路构成零序等值电路。

对称分量法在网络求解方面的应用：联立求解正负零三序网络方程，针对正、负零三序解耦的特性，可衍生为正、负、零三序的入端阻抗、开路电压求解。

### 2.2 不对称系统中对称分量法存在的问题

对称分量法未作整个电压方程的变换，对变压器、发电机，仅是利用序电流通过时的概念，导出其三序阻抗。三相不对称线路的对称分量换不能得解耦的三序电路；三相不对称负荷的对称分量变换不能得解耦的三序电路；三相同步发电机的对称分量变换不易进行；复杂故障的对称分量变换，形式较相分量复杂得多。基于此，提出相分量法。

## 3 三相线路结构不对称分析计算的必要性

三相电路对称、三相电源对称、三相负载对称

的三相对称系统，通常将这三相对称系统简化为单相电路计算。当三相线路结构对称，对称分量法可将线路的三相电路转换为正、负、零三序无互耦合的电路，然后采用对称分量法作三相不对称的计算与分析。对于这个发电、输电及配电而言，配电网是保障供电可靠性、安全性的最主要环节，也是落实智能电网的核心环节。配电网运行状况的严格分析是十分必要的，且对提高电网的运行水平有着关键性、决定性作用。

对于 35kV、10kV 配电网而言，其电源可视为三相对称的无穷大电源，因电网运行的要求，网络一般设置为辐射状的开式网络，且一般为中性点不直接接地的小电流接地系统。尽管局部配网的规模不大，接线形式及运行任务相对简单，但运行环境及意外扰动状况更为复杂，运行方式调整及自动切换状况更为灵活，运行要求也不亚于高压输电网络。同时，也正因为配电网中性点不直接接到的特点，其中性点电位的偏移，使得其运行分析与计算较中性点直接接地的输电网络更为复杂。

三相电路，一般由三相输电线路、三相变压器构成，由于三相间的磁场作用，在三相电路间存在互感。若三相线路（导线）的空间位置不对称，则三相互感就不对称。事实上，三相线路、三相变压器等三相静止元件，因生产工艺、成本和技术等方面的要求，三相导线的空间位置是不对称的，其三相互感就不对称。只不过因不便于计入互感不对称的影响，通常忽略了该现象。但超高压（500kV）、特高压线路（1000kV），不便采用对称三段的换位措施，其三相线路互感是不对称的。另外对于采用了换位措施的 220kV、110kV 线路，当不对称故障发生在线路中时，也破坏了原来的对称性，也引起三相线路的不对称。

当三相负荷不对称或发生单相接地短路时，这是配电网主要需分析的情况，尽管三相负荷不对称程度不一定很严重或短路电流不大，但准确的计算与分析，以便了解其特性，也仍是十分必要的。三相线路参数不对称、中性点电位偏移，变压器联接组别方式的多样性及灵活性，这些状况使得单相等值电路和对称分量法在原理上不便应用。因此，有必要采用相分量的三相等值电路，简明地描述配电网的运行状况。

不对称电源、不对称电路、不对称负载、不对

称多重故障的计算存在，且从继电保护整定、电气设备选择的应用扩展到系统的故障分析和交直流系统的瞬时值电流电压分析和功率分析。

所以，计及三相线路结构不对称的分析与计算是十分必要的。

## 4 电力系统结构不对称线路相分量等值电路

相分量法不需把各相电压电流分解为各序对称分量，直接在相坐标空间对 a, b, c 三相系统列方程进行分析计算的方法<sup>[7-14]</sup>。

### 4.1 输电线路的网型等值电路

无论是输电线路的电感还是静电电容，当线路导线的布置不对称时各相参数具有不同的值。当线路采用完全换位架设时各相参数是对称的，而未进行完全换位的线路，各相参数是不对称的。但是目前正在建设中的主力输电网大都是 500kV 以上的超高压输电线路甚至特高压输电线路，由于经济和技术方面的原因这些线路常常采用不均匀换位的方法。事实上，110kV 以上的输电线也有不均匀换位的情况存在，只不过电压等级越高问题越突出。这些不均匀换位的输电线路是近年来输电网参数不对称的主要原因。无换位架空输电线路，即便线路两端的电压三相对称，也要流过负序、零序电流；反之，即使流过的电流是对称的，线路两端的电压仍含有负序、零序分量，造成电压不对称。架空线路参数不对称时，线路的正序、负序、零序分量回路相互不可分离，相序分量之间存在联系，就会失去对称分量法的优点。

#### 4.1.1 单回路线路的网型等值电路

当采用  $\pi$  型等值电路时，三相单回输电线路的等值阻抗及两个端点处的等值导纳分别如图 4、5 所示。

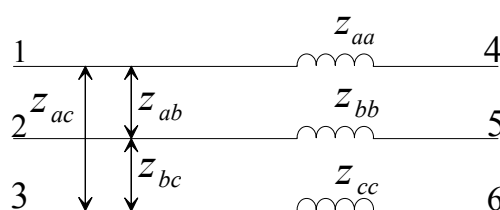


图 4 三相输电线路的等值阻抗

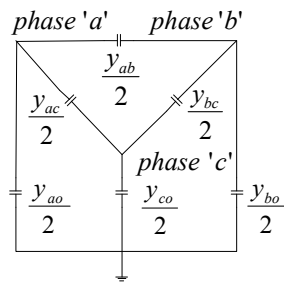


图 5 三相输电线路端点处的等值导纳

图中所示阻抗和导纳分别用

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}, \quad \frac{Y_{shunt}}{2} = \begin{bmatrix} y_{a0}/2 & y_{ab}/2 & y_{ac}/2 \\ y_{ab}/2 & y_{b0}/2 & y_{bc}/2 \\ y_{ac}/2 & y_{bc}/2 & y_{c0}/2 \end{bmatrix}$$

表示, 其中,  $Z_{aa}$ 、 $Z_{bb}$ 、 $Z_{cc}$  为相间的互阻抗;  $Z_{ab}$ 、 $Z_{bc}$ 、 $Z_{ac}$  为相间的互阻抗;  $y_{a0}/2$ 、 $y_{b0}/2$ 、 $y_{c0}/2$  为三相输电线路端点处的自导纳;  $y_{ab}/2$ 、 $y_{bc}/2$ 、 $y_{ac}/2$  为端点处的相间互导纳, 其相分量模型如式 (4) 所示。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{abc} + \frac{1}{2} Y_{shunt} & -Y_{abc} \\ -Y_{abc} & Y_{abc} + \frac{1}{2} Y_{shunt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $Y_{abc} = Z_{abc}^{-1}$ 。

若不计三相单回输电线路端点处的等值导纳, 假设输电线路的三相自阻抗相等且相间互阻抗相等, 则变为:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{abc} & -Y_{abc} \\ -Y_{abc} & Y_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,

$$Z_{abc} = \frac{1}{3} AZ_{012}A^*, \quad Z_{012} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \quad \alpha = 1\angle 120^\circ,$$

$Z_0$ 、 $Z_1$ 、 $Z_2$  为输电线路的零序、正序和负序阻抗。

计及相间互感影响的三相单回原始等值电路为:

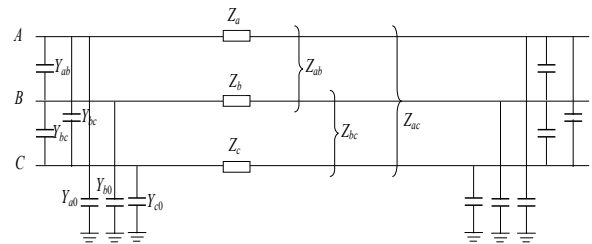


图 6 计及相间互感影响的三相线路等值电路

为便于形成节点导纳矩阵, 去互感后的网型等值电路为:

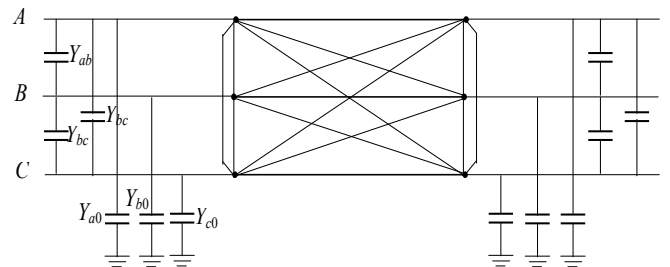


图 7 去互感后的三相线路等值电路

#### 4.1.2 单回路线路间单相接地短路网型等值电路

单回路线路间单相接地短路网型等值电路依上所述就可以得出:

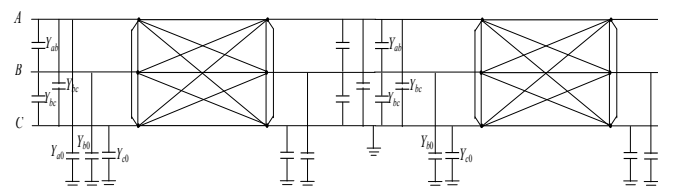


图 8 单回路线路间单相接地短路网型等值电路

#### 4.1.3 同杆双回线路的相分量等值电路

随着电力工业的不断发展, 电力系统中同杆双回线的采用也将日益增多。因此, 研究同杆双回线故障分析的新方法, 提高其故障计算的效率和精确度, 对继电保护装置的正确动作, 乃至系统的安全稳定运行, 具有重要的现实意义。

双回线继电保护的应用必须以故障分析理论为依据,分析双回线故障时由于存在线间互感和跨线故障,电流、电压等电气量呈现不同的特点,这样,不同的故障情况就应配置不同的保护。电力系统一般为对称系统,对于不对称故障和负荷引起的不对称,同杆双回线存在跨线故障,另外不止相间存在互感而且双回线间也存在互感,使得故障特征变得复杂,因此这种输电方式在带来经济效益的同时也给电力系统继电保护提出了新的挑战和要求。随着电力系统的发展和对安全运行要求的进一步提高,继电保护必须紧跟这种变化才可以满足实际要求,所以双回线的继电保护就应该采取不同于单回线的保护方式。

相比之下,基于相分量的同杆双回线路模型则能够从物理上直观的反应线路之间的联系,对于跨线故障的描述也相对较容易,由上面关于单回线路的网型等值电路可推出同杆双回线路的相分量等值电路如下:

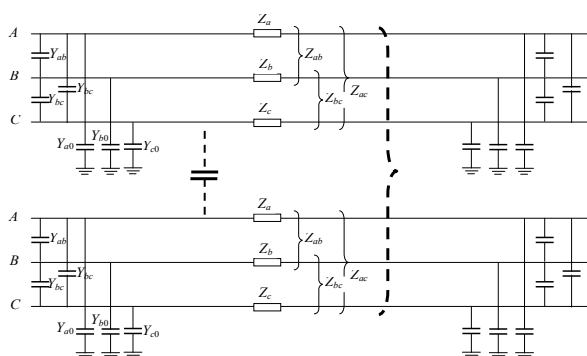


图9 同杆双回线路的相分量等值电路

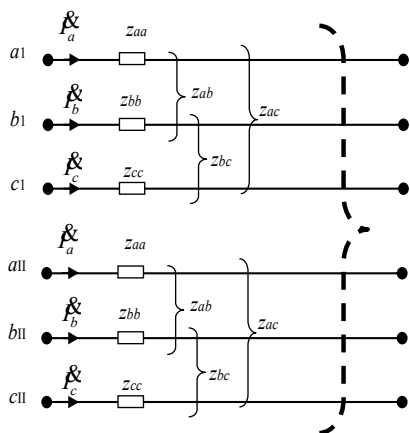


图10 同杆双回线路的相分量简化等值电路

支路电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{aI1} - \dot{U}_{aI2} \\ \dot{U}_{bI1} - \dot{U}_{bI2} \\ \dot{U}_{cI1} - \dot{U}_{cI2} \\ \dot{U}_{aII1} - \dot{U}_{aII2} \\ \dot{U}_{bII1} - \dot{U}_{bII2} \\ \dot{U}_{cII1} - \dot{U}_{cII2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1aa} & Z_{1ab} & Z_{1ac} & Z_{1-IIaa} & Z_{1-IIab} & Z_{1-IIac} \\ Z_{1ba} & Z_{1bb} & Z_{1bc} & Z_{1-IIba} & Z_{1-IIbb} & Z_{1-IIbc} \\ Z_{1ca} & Z_{1cb} & Z_{1cc} & Z_{1-IIca} & Z_{1-IIcb} & Z_{1-IIcc} \\ Z_{IIaa} & Z_{IIab} & Z_{IIac} & Z_{IIa} & Z_{IIab} & Z_{IIac} \\ Z_{IIba} & Z_{IIbb} & Z_{IIbc} & Z_{IIba} & Z_{IIbb} & Z_{IIbc} \\ Z_{IIca} & Z_{IIcb} & Z_{IIcc} & Z_{IIca} & Z_{IIcb} & Z_{IIcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{aI1} \\ \dot{I}_{bI1} \\ \dot{I}_{cI1} \\ \dot{I}_{aII1} \\ \dot{I}_{bII1} \\ \dot{I}_{cII1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

## 5 结论

由于电力系统元件参数的不对称以及运行状态导致的不对称,加上人们对电力系统分析计算不再满足于运算时间上的缩短,而是追求分析计算的准确度的提高,使得基于系统参数完全对称的对称分量法失去了可行性。本文的方法是通过电力系统各元器件的相分量模型,导出各种线路的相分量等值电路和节点导纳矩阵参数,它不要求系统参数是否对称,能从客观上反映了系统元件的实际物理特性,能处理各种任意复杂故障类型,拥有简便、直观、通用、准确的优点;能满足 FACTS 等设备的运行分析要求,是一种处理系统故障计算与运行分析的实用方法。

## 参考文献:

- [1] 何仰赞,温增银.电力系统分析[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [2] 陈珩.电力系统稳态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 邱关源.电路[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [4] 关根泰次著,蒋建民等译.电力系统暂态解析论[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [5] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [6] 曹焱生,林日明.三相参数不对称电力系统断线故障的计算机计算[J].电力系统自动化,1995,19(8): 43-46.
- [7] 曹焱生,林日明.三相参数不对称电力系统短路故障的计算机计算[J].电力系统自动化,1994,18(3): 32-36.
- [8] 姜彤,郭志忠,陈学允,等.多态相分量法及其在电力系统三相不对称分析中的应用[J].中国电机工程学报,2002,22(5):70-74.
- [9] 姜彤.电力系统故障分析及其多态计算方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.
- [10] 傅旭,王锡凡.同杆双回线断相故障计算的解耦相分量法[J].电力系统自动化,2004,28(6):41-44.
- [11] 傅旭,王锡凡.同杆双回线跨线短路故障计算的等值双端电源相分量法[J].电力系统自动化,2004,28(7):54-57.

- [12] 黄锐锋,李琳.新的基于相分量的变压器模型及其在统一  
广义双侧消去法中的应用[J].中国电机工程学  
报,2004,24(7):188-193.
- [13] 曹国臣,张洪波.采用虚拟网络加网络操作法的双回线故  
障计算方法[J].中国电机工程学报,2006,26(2):71-77.
- [14] 王安宁.基于相分量法的电力系统故障计算方法研究  
[D].济南:山东大学,2009.

---

**作者简介:**

梅雪峰(1986-),男,江苏东台人,电力调度控制中心调  
度员, E-mail: meixuefeng@js.sgcc.com.cn。