

文章编号:1000-582X(2003)05-0030-03

# 三相不对称相分量谐波潮流计算\*

唐云龙, 罗建, 颜伟, 刘方, 王官浩

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**随着电力系统中谐波的日益增多,单相谐波潮流计算已不能满足要求。详细讨论了三相配电网中谐波情况下的发电机、变压器、线路、负荷的模型,尤其考虑了变压器接线方式、移相作用和非标准变比对三相不对称谐波潮流的影响,推导了变压器两侧相应的相电压、相电流关系,并针对在传统谐波潮流算法中考虑了变压器三相模型后有可能不收敛的问题,提出了一种基于支路电流前推回代的相分量谐波潮流算法。算例计算表明该算法是非常有效的。

**关键词:**谐波潮流;相分量;前推回代

**中图分类号:**TM744

**文献标识码:**A

近年来,随着电力电子技术的广泛应用以及各种非线性负载的增多,电力系统中的谐波污染日益严重,已成为影响电能质量的公害。目前人们对谐波的分布计算一般都采用单相模型分析法,事实上这一方法是不能满足精确计算需要的,因为电力系统中的不对称现象随处可见,例如:不对称的电源,不对称输电线路,不对称负荷等<sup>[1-2]</sup>。既然电力系统三相对称不可能实现,那么采用单相模型分析法进行谐波潮流计算时必然会产生较大的误差<sup>[3]</sup>。为了更精确的计算谐波在电力系统中的分布,并且针对在传统潮流算法中考虑了变压器三相模型后有可能不收敛的问题,笔者采用三相不对称情况下基于支路电流前推回代的相分量分析法。

## 1 网络模型

### 1.1 变压器模型

与对称潮流计算不同,在三相基波和谐波潮流中,除了要考虑变压器对电压、电流大小的影响,还要注意变压器接线方式对基波和谐波各序分量引起的不同转角。设 $\theta$ 是取决于绕组连接方式的移相角,双绕组变压器等值电路如图1。

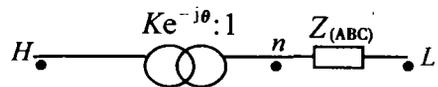


图1 双绕组变压器模型

其中 $Ke^{j\theta}$ 是考虑变压器移相角的变比; $Z_{(ABC)}$ 是归算到低压侧的变压器三相阻抗。

变压器高压侧节点 $H$ 与 $n$ 之间的电压、电流序分量关系式分别见式(1)、式(2),其中 $I_{X(1)}$ 、 $I_{X(2)}$ 、 $I_{X(0)}$ 分别代表 $X(X=H, L$ 或 $n)$ 节点的A相电流正序、负序、零序分量; $V_{X(1)}$ 、 $V_{X(2)}$ 、 $V_{X(0)}$ 、分别代表 $X$ 节点的A相电压正序、负序、零序分量。

$$\begin{bmatrix} I_{H(1)} \\ I_{H(2)} \\ I_{H(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} I_{n(1)} \cdot e^{-j\theta} \\ I_{n(2)} \cdot e^{-j\theta} \\ I_{n(0)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{n(1)} \\ V_{n(2)} \\ V_{n(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} V_{H(1)} \cdot e^{-j\theta} \\ V_{H(2)} \cdot e^{-j\theta} \\ V_{H(0)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过对称分量法的相分量与序分量的相互转换关系式,容易得到变压器 $H$ 与 $n$ 的电压、电流相分量关系:

\* 收稿日期:2003-01-15

作者简介:唐云龙(1976-),男,安徽马鞍山人,重庆大学硕士研究生,从事电力系统谐波研究。

$$\begin{bmatrix} I_{HA} \\ I_{HB} \\ I_{HC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} e^{-j\theta} + e^{j\theta} + 1 & a \cdot e^{-j\theta} + a^2 \cdot e^{j\theta} + 1 & a^2 \cdot e^{-j\theta} + a \cdot e^{j\theta} + 1 \\ a^2 e^{-j\theta} + a e^{j\theta} + 1 & e^{-j\theta} + e^{j\theta} + 1 & a \cdot e^{-j\theta} + a^2 \cdot e^{j\theta} + 1 \\ a \cdot e^{-j\theta} + a^2 \cdot e^{j\theta} + 1 & a^2 \cdot e^{-j\theta} + a \cdot e^{j\theta} + 1 & e^{-j\theta} + e^{j\theta} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{nA} \\ I_{nB} \\ I_{nC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{nA} \\ V_{nB} \\ V_{nC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 & a \cdot e^{j\theta} + a^2 \cdot e^{-j\theta} + 1 & a^2 \cdot e^{j\theta} + a \cdot e^{-j\theta} + 1 \\ a^2 \cdot e^{j\theta} + a \cdot e^{-j\theta} + 1 & e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 & a \cdot e^{j\theta} + a^2 \cdot e^{-j\theta} + 1 \\ a \cdot e^{j\theta} + a^2 \cdot e^{-j\theta} + 1 & a^2 \cdot e^{j\theta} + a \cdot e^{-j\theta} + 1 & e^{j\theta} + e^{-j\theta} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{HA} \\ V_{HB} \\ V_{HC} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $I_{XA}$ 、 $I_{XB}$ 、 $I_{XC}$  分别代表 X 节点的 A 相、B 相、C 相电流;  $V_{XA}$ 、 $V_{XB}$ 、 $V_{XC}$  分别代表 X 节点的 A 相、B 相、C 相电压;  $a = e^{j120^\circ}$ ,  $a^2 = e^{j240^\circ}$ 。

以上考虑的是零序电流能够通过变压器时的情况,由于变压器中零序通路与变压器接线方式和结构密切相关,因此,如果零序电压施加在变压器绕组的三角形侧或不接地星形侧时,零序电流不能通过变压器。经推导可知此时只需把式(3)、式(4)中系数矩阵各元素中的 1 去掉,就相当于将  $I_{H(0)}$  和  $V_{n(0)}$  定为零。当高压侧没有零序通路时,修正式(3)的系数矩阵;当低压侧没有零序通路时,修正式(4)的系数矩阵。

在三相潮流计算中,变压器可近似看作是对称元件,因此它就具有正、负、零序解耦的特性,设其正、负、零序阻抗分别为  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_0$ ,对于变压器而言,一般  $Z_1 = Z_2$ ,因此经过序分量和相分量的变换,容易得到变压器的相阻抗形式:

$$\begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 = 2Z_1 & Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 + 2Z_1 & Z_0 - Z_1 \\ Z_0 - Z_1 & Z_0 - Z_1 & Z_0 + 2Z_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中  $Z_{AA}$ 、 $Z_{BB}$ 、 $Z_{CC}$  为 ABC 三相的自阻抗;  $Z_{AB}$ 、 $Z_{BC}$ 、 $Z_{CA}$  为 ABC 三相间的互阻抗。

当变压器 L 侧没有零序通路时,只需要将  $Z_0$  定为零,使得 n 与 L 间的零序电压降落为零。

对于三绕组变压器,可以将它表示为三个双绕组变压器,然后仿照双绕组变压器的方法进行推导便可以得到其模型。

以上讨论的是基波情况下的变压器三相模型。在谐波情况下,变压器的等效电感可近似认为不变,其谐波电抗与谐波次数成正比,而绕组的集肤效应和铁芯的涡流损耗等在谐波的作用下会有所增大,根据一些统计资料表明,变压器的谐波等值电阻大致与谐波次数的平方根成正比。变压器的 k 次谐波阻抗可表示为:

$$Z_{Tn} = \sqrt{k}R_{Tn} + jkX_{Tn} \quad (6)$$

式中 k 为谐波次数;  $R_{Tn}$ 、 $X_{Tn}$  分别为变压器的基波电阻和相应的序电抗。于是,参照基波情况下的推导,就不难得到变压器谐波下的三相阻抗形式。

## 1.2 输电线模型

一般情况下,基波时输电线路经过交叉换位后,可以认为它是对称的,个别没有换位的线路,就必须把它当作不对称来处理。对称时的推导过程和变压器类似,不对称的情况可以参考本文后的有关具体文献[4]。在谐波情况下,在基波推导的基础上,笔者还要考虑在高次谐波作用下的输电线路的分布参数特性,为此在计算中采用双曲线函数计算输电线路等值电路参数,得到其  $\Pi$  型等值电路模型。

## 1.3 发电机模型

对于投入正常运行发电机,忽略其本身结构和其它一些微小因素的影响,可以认为是对称的。在谐波时,不考虑同步发电机的谐波源作用,不论外界正序还是负序电流注入时,定子绕组通过电机内部的旋转磁场与励磁绕组、阻尼绕组以及转子铁心间的耦合作用与负序基波电流注入时是类似的;而当零序谐波电流注入时,其效果同零序基波电流注入时也类似。于是,不难得到同步发电机的节点导纳矩阵:

$$Y^* = -j \frac{1}{k} T \begin{bmatrix} 1/X_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/X_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/X_2 \end{bmatrix} T^{-1} \quad (7)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}$$

式中  $X_0$  为同步发电机基波下的零序电抗;  $X_2$  为同步发电机基波下的负序电抗。

## 1.4 负荷模型

由于负荷的位置和大小都是随机的,要精确确定负荷的模型就显得非常困难,因此可以通过一种合适

的假定来求得一种近似的模型。比较常用的方法就是用一台等值电动机与一个电抗并联来表示一条母线上的综合等值负荷。计算时可以根据基波时每相的有功功率与无功功率求出等值电抗和电阻,然后再计及谐波的影响进行修正(零序电流一般不进入负载,所以不考虑零序谐波)。如图2所示:

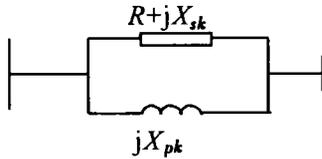


图2 谐波下的负荷等值电路

图中的参数可以按如下各式确定:

$$R = U_1^2 / P_1 \quad (8)$$

$$X_{sk} = 0.073kR \quad (9)$$

$$X_{pk} = kR / (6.7 \times Q_1 / P_1 - 0.74) \quad (10)$$

以上各式中, $U_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 分别为基波时的母线电压、负荷的有功功率和无功功率; $k$ 为谐波次数。有一点值得注意的是,上述的负荷不应将系统中的补偿电容器组和电抗器计入,它们应该被单独考虑。

## 2 算法分析

首先,求解三相基波潮流。具体步骤见文献[5]。

其次,建立对应于相应谐波次数的三相谐波导纳矩阵,求解线性方程组,解得节点谐波电压。线性方程组也就是节点电压方程组,如式(11)所示:

$$I_k = Y_k U_k \quad (11)$$

其中 $I_k$ 为节点的 $k$ 次谐波注入电流向量; $U_k$ 为节点的 $k$ 次谐波电压向量; $Y_k$ 为系统 $k$ 次谐波导纳矩阵。

最后,利用所求得的谐波分量修正对应基波方程中对应量,这包括节点的每相有功功率、无功功率、节点电压幅值和相角。修正完毕后,再进行迭代计算,直至满足所需条件为止。

## 3 算例

本算例引用的是文献[6]中一个40节点系统,系统中的各参数可参考具体文献[6]。其中谐波节点为其中的第15节点,每相谐波电流注入量为该相基波电流的2%(仅以5次谐波为例)。

部分结果如表1,表2所示。

表1 计算结果部分基波

节点	$V_A$	$V_B$	$V_C$	$\varphi_A/(^\circ)$	$\varphi_B/(^\circ)$	$\varphi_C/(^\circ)$
6	0.993 9	0.993 7	0.992 9	-0.001 2	-2.094 9	2.092 1
7	0.992 0	0.991 9	0.990 5	-0.001 2	-2.094 6	2.092 0
8	0.993 2	0.993 0	0.992 3	-0.001 2	-2.094 8	2.092 1
14	0.990 9	0.990 7	0.988 5	-0.001 2	-2.094 4	2.091 8
15	0.990 2	0.990 0	0.987 9	-0.001 2	-2.094 3	2.091 8
16	0.992 0	0.991 9	0.990 5	-0.001 2	-2.094 6	2.092 0
17			0.988 1			2.091 8

说明:表1中 $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 表示三相电压幅值标么值; $\varphi_A$ 、 $\varphi_B$ 、 $\varphi_C$ 表示三相电压相角,单位为度。

表2 计算结果部分谐波

节点	$V_{Ak}$	$V_{Bk}$	$V_{Ck}$	$\varphi_{Ak}/(^\circ)$	$\varphi_{Bk}/(^\circ)$	$\varphi_{Ck}/(^\circ)$
6	0.005 7	0.005 5	0.004 9	0.684 0	-1.484 0	2.726 5
8	0.005 7	0.005 5	0.004 9	0.682 7	-1.485 1	2.725 0
17	0.005 8	0.005 5	0.004 9	0.686 8	-1.479 7	2.730 2
16	0.005 8	0.005 5	0.004 9	0.686 8	-1.479 7	2.730 2
14	0.005 8	0.005 5	0.005 0	0.691 2	-1.474 2	2.734 8
15	0.005 8	0.005 6	0.005 0	0.693 8	-1.471 3	2.738 8
17			0.005 0			2.733 8

说明:表2中 $V_{Ak}$ 、 $V_{Bk}$ 、 $V_{Ck}$ 表示三相谐波电压幅值标么值; $\varphi_{Ak}$ 、 $\varphi_{Bk}$ 、 $\varphi_{Ck}$ 表示三相谐波电压相角,单位为度。

## 4 结论

本文在前人的基础上较为详细的讨论了三相不对称谐波潮流的计算,对谐波状况下的系统模型进行了分析,并在matlab上编制了相应的计算程序,通过对算例的计算表明了所建立的谐波模型和所写程序的可行性。本文的工作为分析谐波对电力系统的影响及研究相应的治理措施提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 李庚银,徐春侠.含牵引负荷的电力系统三相不对称谐波潮流计算[J].电力系统自动化,1999,23(17):26-30.
- [2] 吴命利,李群湛.电力系统与牵引供电系统三相谐波模型[J].铁道学报,1999,21(1):44-47.
- [3] 周勇.电力系统三相不对称潮流计算[J].电网技术,1996,20(1):24-29.
- [4] 程浩忠.电力系统谐波技术[M].上海:上海交通大学出版社,1998.
- [5] 陈亚民.一种不对称电力系统潮流算法[J].电网技术,1997,21(6):8-13.
- [6] 颜伟,刘方,王官洁.三相辐射型配电网的相分量潮流计算[J].电力系统自动化,2002,26(10):24-27.

(下转第36页)

- 刊): 188 - 190.
- [9] 黄晓峰,周宏,何镇明. 富铈稀土对镁合金起燃温度的影响[J]. 中国有色金属学报,2001,11(4): 638 - 641.
- [10] 轻金属加工手册编写组. 轻金属加工手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1979.
- [11] 余琨,黎文献,李松瑞,等. 含稀土镁合金的研究与开发[J]. 特种铸造及有色合金,2001,(1): 41 - 43.
- [12] ZENG X Q, WANG Q D, LU Y Z, et al. Behavior of surface oxidation on molten Mg - 9Al - 0.5Zn - 0.3Be alloy [J]. Mater Sci & Eng, 2001, A301(2): 154 - 161.
- [13] 黄晓峰,周宏,何镇明. AZ91D加铈阻燃镁合金氧化膜结构分析[J]. 中国稀土学报,2002,20(1): 49 - 52.

## Effect of Mischmetal Additions on the Ignition Temperature of Molten ZM5 Magnesium Alloy

ZOU Yong-liang, LI Hua-ji, XUE Han-song, RAO Jing-song

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Magnesium alloy is prone to burning during its melting and casting in air, which is a major factor in obstructing its application. Fluxes and cover gases are currently used for the melting and production processes, and semi-solid thixocasting is also used to lower the operation temperature, but there still remain many problems. Alloying is a promising method of preventing Mg from burning. The effect of mischmetal additions on the ignition temperature of ZM5 Mg alloy was investigated and compared with that of pure rare earths. It is shown that an addition of 0.12 % mischmetal can greatly heighten the ignition point and such an alloy can be widely applied.

**Key words:** magnesium alloy; mischmetal; ignition temperature

(责任编辑 李胜春)

(上接第 32 页)

## Three Phase Harmonic Power Flow Using Phase Component for Asymmetric Network

TANG Yun-long, LUO Jian, YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** With the increasement of the harmonic quantity in power system, single-phase harmonic power flow calculation can't meet the needs. This paper discusses the components model in detail under harmonic condition in three-phase distribution power system, include generator, transformer, line and load. Particularly, the transformer model considers the winding connection, the phase-shifting among primary and secondary windings, and the off-normal tapping. The three-phase model of transformer, used in traditional harmonic power flow, may prevent the model from converging, so the paper proposes a three-phase back-forward sweep harmonic load flow algorithm based on phase-components. At last, a test example was used to prove the algorithm. The results indicate that the proposed method is efficient.

**Key words:** harmonic power flow; phase component; back-forward sweep

(责任编辑 李胜春)