

# 基于对称分量法的变压器谐波传输特性研究

周 晋, 郭 蕾, 黄 军, 魏 光

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 基于对称分量理论, 利用变压器的谐波模型, 对三相不平衡系统中的谐波传输进行了研究, 重点考察了变压器接线方式对谐波传输的影响; 并在此基础上, 提出了综合电压不平衡度。仿真和实测数据验证了对称分量理论在分析谐波与负序相互作用时的正确性和可行性。

**关键词:** 对称分量法; 变压器; 综合电压不平衡度

**Abstract:** Based on symmetrical component method, the harmonic transmission in unbalance three-phase system is studied by using transformer harmonic model. The influence of transformer connection mode on harmonic transmission is mainly analyzed. On this basis, total voltage unbalance degree is proposed. Finally, the accuracy and feasibility of symmetrical component method are verified by the simulation and the measured data in the case of analyzing the interaction of harmonics and negative sequence.

**Key words:** symmetrical component method; transformer; total voltage unbalance degree

**中图分类号:** TM401 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)01-0028-04

随着高压直流输电的发展和各种电力电子装置的大量应用, 电力系统的非线性负荷部分越来越不容忽视, 使得谐波问题更加突出。对不平衡的三相系统, 由于系统自身的不对称或者负荷的不对称使得系统的谐波呈现明显的不对称性。目前一些文献都是将谐波和负序分开进行研究<sup>[1~3][7]</sup>, 而在实际中谐波和负序是紧密联系在一起, 尤其在谐波情况下其不对称性更加明显。变压器是电网中的重要传输器件之一, 采用对称分量法对其在不对称谐波下的特性进行了研究, 提出了综合不平衡度并通过仿真和实测数据验证了该参数在分析谐波与负序相互作用时的合理性和准确性。

## 1 理论基础

### 1.1 三相系统中的三类不对称

一般三相系统电气量可以表示成  $S_a(t)$ 、 $S_b(t)$  和  $S_c(t)$ ; 当三相电气量满足式 (1) 时, 称其为对称三相系统。

$$S_a(t) = S_b(t+T/3) = S_c(t-T/3) \quad (1)$$

从式 (1) 可以看出对称三相系统必须满足两个条件: 一是三相幅值相等; 二是三相相角满足 A 相超前 B 相  $1/3$  个周期, B 相超前 C 相  $1/3$  个周期。根据这两个对称条件可以将不对称系统分为三类, 见表 1。

表 1 三类不对称

| 类 型    | 不对称条件                                  |
|--------|--|
| 第一类不对称 | 仅三相幅值不相等                               |
| 第二类不对称 | 仅三相相角不循环 (A-B-C) 相差 $1/3$ 个周期          |
| 第三类不对称 | 三相幅值不相等, 且三相相角不循环 (A-B-C) 相差 $1/3$ 个周期 |

### 1.2 三种类型的谐波

以电压为例, 假设其平均值为零, 三相系统的电压通过傅里叶变换可以表示成以下形式,

$$\begin{cases} u_a(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N U_a^k \cos(k\omega t + \alpha_a^k) \\ u_b(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N U_b^k \cos[k(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + \alpha_b^k] \\ u_c(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^N U_c^k \cos[k(\omega t + \frac{2}{3}\pi) + \alpha_c^k] \end{cases} \quad (2)$$

根据  $k$  的不同取值, 谐波可分为 3 种类型: 正序性、负序性和零序性, 如表 2 所示。

表 2 谐波的类型

| 谐波次数 ( $k$ ) | 角速度            | 性质  |
|--------------|----------------|-----|
| $3n$         | $3n\omega$     | 零序性 |
| $3n+1$       | $(3n+1)\omega$ | 正序性 |
| $3n+2$       | $(3n+2)\omega$ | 负序性 |

### 1.3 对称分量法和综合电压不平衡度

对于不对称的畸变三相系统, 可以先通过傅里叶变换将每相的基波和谐波提取出来, 再通过对称分量

法逐次分解为正序分量、负序分量和零序分量,即

$$u_r^k = Tu^k = [U_{T1}^k \ U_{T2}^k \ U_{T3}^k]^T \quad (3)$$

其中,  $u^k = [U_a^k \ U_b^k \ U_c^k]^T$ , 表示 a、b、c 三相的 k 次谐波电压。

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 式中 } \alpha = e^{j120^\circ}$$

$U_{T1}^k$ 、 $U_{T2}^k$ 、 $U_{T3}^k$  分别表示 k 次谐波的正序分量、负序分量和零序分量。

对于不同类型的谐波, 定义了平衡电压、不平衡电压和综合电压不平衡度, 其计算式分别为式 (4)、式 (5) 和式 (6)。

平衡电压: 基波和正序性谐波的正序电压、负序性谐波的负序电压和零序性谐波的零序电压。

不平衡电压: 基波与正序性谐波的负序与零序电压、负序性谐波的负序电压与零序电压以及零序性谐波的负序电压和零序电压。

综合电压不平衡度: 不平衡电压所占平衡电压的百分比。

$$U^b = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} [(U_{T1}^{3n+1})^2 + (U_{T2}^{3n+2})^2 + (U_{T3}^{3n+3})^2]} \quad (4)$$

$$U^{ub} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} [(U_{T2}^{3n+1})^2 + (U_{T3}^{3n+1})^2 + (U_{T2}^{3n+2})^2 + (U_{T3}^{3n+2})^2 + (U_{T1}^{3n+3})^2 + (U_{T2}^{3n+3})^2]} \quad (5)$$

$$UBD = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{U_{ubn}^2}{U_{ln}^2} \right)} \quad (6)$$

#### 1.4 谐波阻抗和 $\Delta$ 接法的影响

许多文献介绍了变压器的谐波阻抗<sup>[4~7]</sup>, 一致认为变压器的阻抗随频率的变化关系为  $Z_{Tn} = \sqrt{h}R_{T1} + jhX_{T1}$ 。式中, h 为谐波次数;  $R_{T1}$  为变压器的基波电阻;  $X_{T1}$  为变压器的基波电抗。在假设三相变压器绕组对称的前提下, 提出了变压器的等效单相阻抗模值

$Z_{eq}$ , 用此值可以评价变压器损耗与谐波次数之间的关系。

$$Z_{eq} \text{ 的定义式为: } Z_{eq} = \frac{U_{eq}^2}{S_{in} - S_{out}} \quad (7)$$

式中,  $U_{eq}$  表示等效单相电压 ( $U_{eq} = \frac{1}{3} \sqrt{U_A^2 + U_B^2 + U_C^2}$ );  $S_{in}$  表示变压器输入的视在功率;  $S_{out}$  表示变压器输出的视在功率。

变压器  $\Delta$  接法主要对零序电流起到阻断的作用, 由于零序电流是同相的, 在变压器的  $\Delta$  接绕组内形成环流, 以致于经过  $\Delta$  接的变压器将不会出现零序电流。所以零序电流对变压器的损耗有很大的贡献。

## 2 仿真验证

应用 Matlab/Simulink 进行了仿真试验, 仿真图如图 1 所示。

其中, 谐波电流源内阻为  $1 \Omega$ , 内感为  $10^{-3} L$ ; 等效系统内阻为  $1 \Omega$ , 内感为  $10^{-3} H$ ; 变压器容量为 250 MVA, 额定电压 110/10.5 kV, 绕组电阻 0.004 pu, 电感 0.08 pu。当变压器分别为  $Y_g/Y_g$  接法和  $Y_g/\Delta$  接法时, 根据式 (7) 可以算得变压器的等效谐波阻抗见表 3。

由表 3 可见, 当变压器为  $Y_g/Y_g$  接法时, 其等效阻抗随频率的增加而增加, 基本符合线性特性; 当变压器为  $Y_g/\Delta$  接法时, 3、6、9 次谐波的阻抗比其他次数的阻抗大得多, 甚至相差 3 个数量级, 这说明在三相对称谐波下,  $\Delta$  接法对零序性电流有很强阻断作用。

图 1 中变压器采用了  $Y_g/\Delta$  接法, 对 3 次谐波电流源的三类不对称分别进行了仿真, 仿真结果见图 2~图 5 和表 5。其中, 图 2~图 5 为选取 A 相为例时的仿真图; 表 5 中的电流为变压器次边三相电流的有效值。

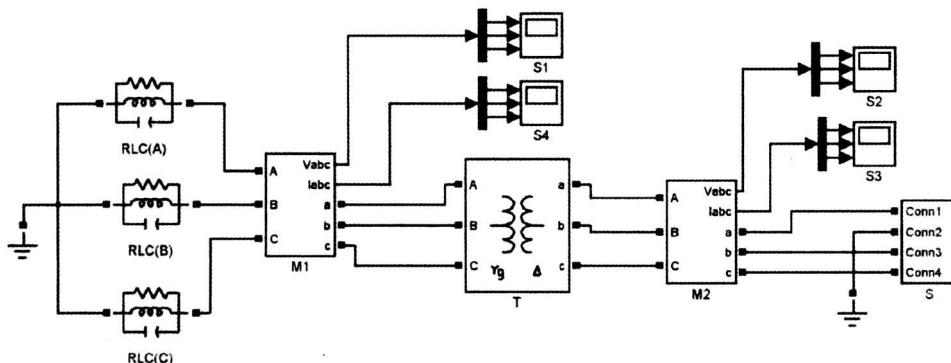


图 1 Matlab/Simulink 仿真图

表 3 变压器的等效谐波阻抗  $Z_{eq}$

| 谐波次数                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Y_g/Y_g$ 接时的 $Z_{eq}$    | 0.217 | 0.421 | 0.647 | 0.843 | 1.069 | 1.238 | 1.478 | 1.631 | 1.938 | 2.092 |
| $Y_g/\Delta$ 接时的 $Z_{eq}$ | 0.218 | 0.453 | 164.0 | 0.881 | 1.094 | 13.48 | 1.554 | 1.794 | 22.10 | 2.257 |

表 4 三类不对称谐波情况下变压器高压侧  
三相电流的理论值与实际值的比较

| 分 类        | 理论计算值 (A) | 仿真值 (A) | 误差 (%) |      |
|------------|-----------|---------|--------|------|
| 第一类<br>不对称 | a相        | 3.72    | 3.72   | 0    |
|            | b相        | 1.86    | 1.85   | 0.54 |
|            | c相        | 1.86    | 1.87   | 0.54 |
| 第二类<br>不对称 | a相        | 12.88   | 12.66  | 1.71 |
|            | b相        | 6.44    | 6.35   | 1.40 |
|            | c相        | 6.44    | 6.31   | 2.02 |
| 第三类<br>不对称 | a相        | 9.84    | 9.73   | 1.12 |
|            | b相        | 4.92    | 4.87   | 1.02 |
|            | c相        | 4.92    | 4.86   | 1.22 |

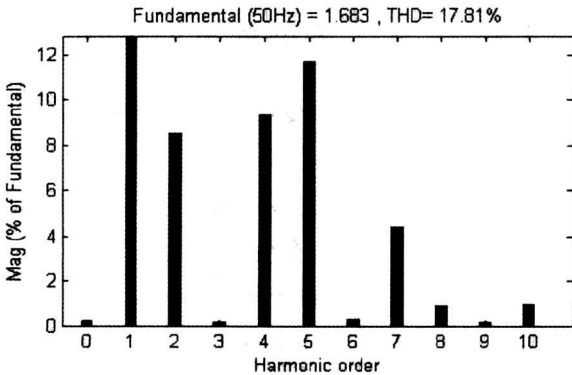


图 2 三相对称谐波下的高压侧 A 相谐波含量

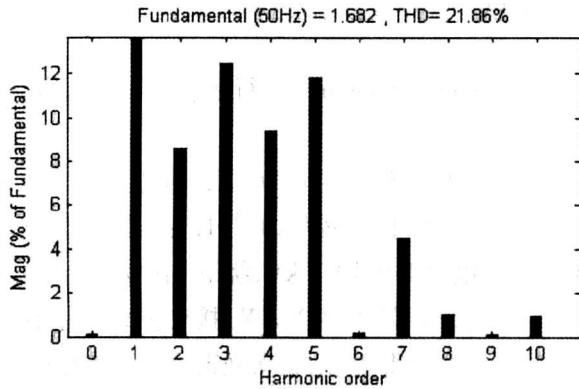


图 3 第一类不对称情况下的高压侧 A 相谐波含量

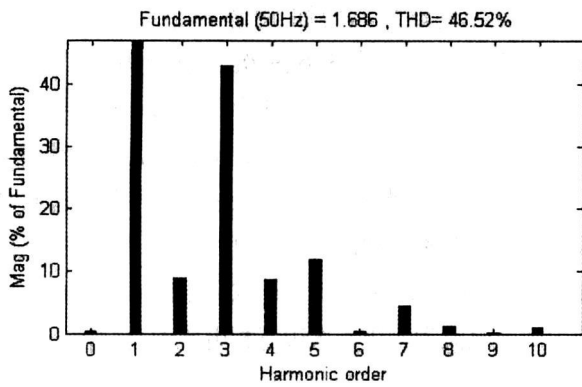


图 4 第二类不对称情况下的高压侧 A 相谐波含量

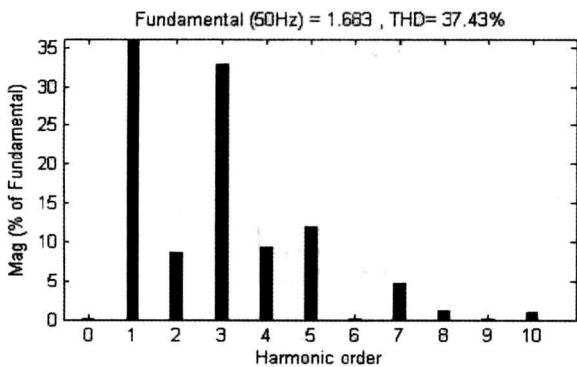


图 5 第三类不对称情况下的高压侧 A 相谐波含量

注:理论计算值是三相电流分别扣除零序电流以后的有效值。

从图 2 与图 3、4、5 的比较可以看出:3 种不对称情况下,变压器高压侧的 3 次谐波含量都很高,这表明  $\Delta$  接法只能阻断 3 次谐波的平衡部分,不平衡部分依然可以通过。由表 4 可以看出:将电流减去其零序部分即为理论计算值,其值与仿真值的相对误差很小,从而说明采用对称分量法分析不对称谐波是合理的、准确的;谐波不对称对相角的敏感度比对幅值的敏感度要大,因为仿真中第一类不对称情况下误差最小,第三类次之,第二类最大。

### 3 实测数据验证

对四川省江油牵引变电所主变压器的高压侧三相电压进行了 24 h 的实时监测,包括基波和 2~20 次谐波。通过对称分量法,可以得到各次谐波的序电压,由于文章篇幅有限,只列出了 2~5 次谐波的序电压图,分别见图 6~图 8。

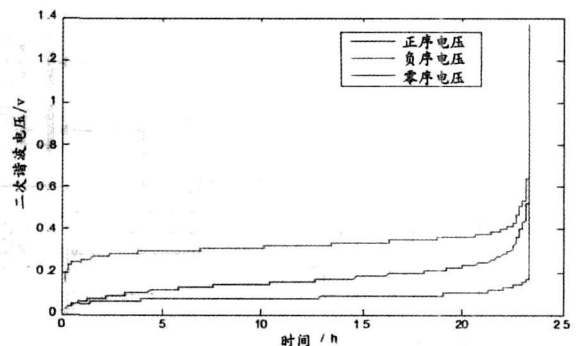


图 6 2 次谐波的序电压

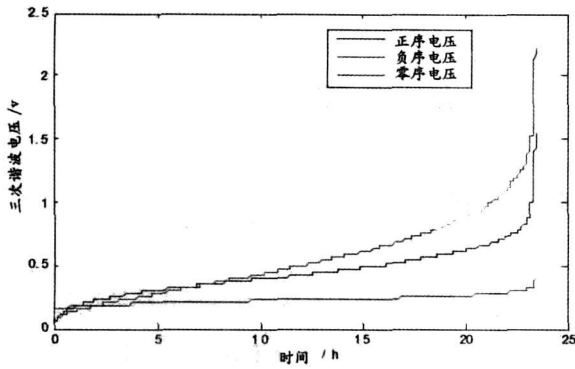


图 7 3 次谐波的序电压

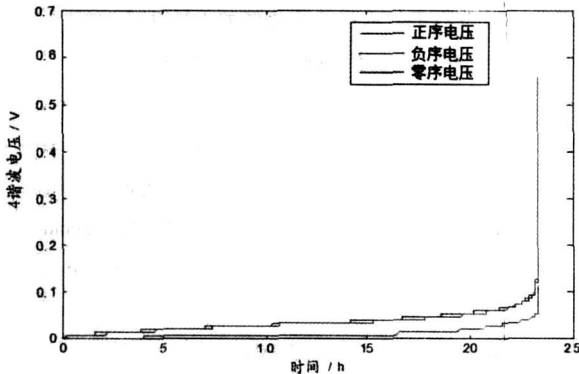


图 8 4 次谐波的序电压

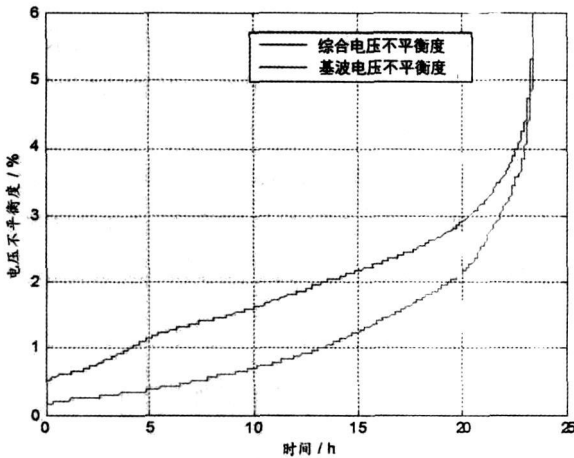


图 9 综合电压不平衡度与基波电压不平衡度的比较

表 5 2~5 次谐波序电压的统计值

| 谐波次数 | 2 次 |          | 3 次     |          | 4 次     |          |         |
|------|-----|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
|      | 平均值 | 95% 概率大值 | 平均值     | 95% 概率大值 | 平均值     | 95% 概率大值 |         |
| 电压幅值 | 正序  | 0.163 6  | 0.288 9 | 0.440 4  | 0.743 3 | 0.036 1  | 0.072 1 |
|      | 负序  | 0.329 9  | 0.405 4 | 0.544 4  | 1.135 5 | 0.035 6  | 0.070 0 |
|      | 零序  | 0.081 4  | 0.120 6 | 0.230 4  | 0.292 3 | 0.011 6  | 0.036 0 |

2 次谐波属于负序性谐波, 3 次谐波属于零序性谐波, 5 次谐波属于正序性谐波。从图 6~图 8 和表 7 来看, 各次谐波的零序电压都很小, 这是因为该牵引变压器采用的是 YN, d11 接法; 而每次谐波的负序电压都很大, 这说明谐波下不对称现象更为严重, 进

一步证明对谐波进行序分量法的现实性和重要性。

根据式 (6) 可以算得实测三相电压的综合电压不平衡度, 与基波电压不平衡度相比, 综合电压不平衡度要大, 如图 9 所示。综合电压不平衡度的 95% 概率大值为 3.736 1, 而基波电压不平衡度的 95% 概率大值为 3.238 6, 这是因为综合电压不平衡度考虑和体现了谐波下的不对称。

## 4 结 论

在实际三相系统中, 电压不对称普遍存在, 在谐波情况下更为严重。对于不对称谐波, 可以利用对称分量法分解为序分量, 运用序分量能够方便地解释不同接线的变压器在谐波渗透中的作用; 在谐波下, 相角不对称比幅值不对称更为敏感; 通过综合电压不平衡度衡量系统的对称性可以体现系统中谐波的不对称, 更为合理。

## 参考文献

- [1] Shi-Lin Chen, Ray-Jong Li and Pao-Hsiang His. Traction System Unbalance Problem — Analysis Methodologies [J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 4, OCTOBER 2004.
- [2] 孙旻, 陈学林. 220 kV 单相牵引系统负序电流计算及分析方法 [J]. 江西电力职业技术学院学报, 2006. 6.
- [3] 刘晓宇, 陈建业. 铁路牵引系统中的负序计算和仿真 [J]. 变流技术与电力牵引, 2007. 3.
- [4] George J. W. Kileh 著. 徐政译. 电力系统谐波——基本原理和滤波器设计 [M]. 机械工业出版社, 2003.
- [5] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger. 电力系统谐波 [M]. 唐统一, 吴震春, 孙树勤译. 北京: 中国矿业大学出版社, 1991.
- [6] 吴竟昌, 孙树勤. 电力系统谐波 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [7] 王猛. 电力系统谐波、负序过程仿真及应用 [C]. 西南交通大学研究生学位论文, 2003.

## 作者简介:

周 晋 (1983—), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统谐波分析。

郭 蕾 (1980—), 女, 山东人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统谐波分析。

黄 军 (1983—), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 研究方向为供电仿真与优化。

魏 光 (1984—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。

(稿日期: 2008-11-10)