

# 配电网谐波潮流计算

钟 茜

(四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 中低压配电网谐波潮流计算问题, 适宜采用三相分析方法。系统分析了国标 GB/T 14549-93、GB/Z 17625.4-2000 对谐波限值以及谐波叠加方法的规定。对中低压配电网中的电气元件如变压器、传输线、负荷等构建了三相谐波模型, 并提出了配网谐波潮流计算的步骤和方法。

**关键词:** 配电网; 谐波; 潮流

**Abstract:** Three phase analysis method is recommended to the harmonic power flow calculation for distribution network with middle and low voltage level. The harmonic emission limit and the harmonic superposition method in GB/T 14549-93 and GB/Z 17625.4-2000 are analyzed. The three phase harmonic models of transformer, transmission line and load are established. The process of power flow calculation of distribution network is presented.

**Key words:** distribution network; harmonic; power flow

**中图分类号:** TM861 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0029-04

谐波是电环境的污染物。像很多其他形式的污染一样, 谐波的发生要影响整个电环境, 而且可能波及离谐波源很远的地方。谐波会对电力系统和用户造成一系列危害, 比如引起系统局部谐振, 增加附加发热和损耗, 造成设备故障; 导致电力设备不正常工作, 加速电力设备老化等。因此, 对配电网进行谐波潮流计算, 估算配电网电能质量情况, 具有重要的现实意义。

中国中低压配电网的三相参数是不对称的, 而且由于低压侧单相负荷的存在, 使得正常运行时, 三相负荷通常不对称。对配电网谐波潮流分析宜采用三相模型分析法。如图 1 所示系统, 假设有若干组谐波源注入到配电网。如果配电网系统为线性无源系统, 则可应用叠加原理分别计算各次谐波。通过直接求解式 (1), 即可求得系统各母线公共连接点的谐波电压  $[V_h]$ 。



图 1 不平衡电流注入配网系统

$$[I_h] = [Y_h][V_h] \quad (1)$$

式中,  $[I_h]$ 、 $[Y_h]$ 、 $[V_h]$  中每一个元素都是由自导纳和互导纳组成的  $3 \times 3$  阶矩阵。

## 1 谐波发射限值<sup>[1,2]</sup>

中国对谐波问题的研究始于 20 世纪 80 年代。1991 年谐波国家标准起草小组提交了 GB/T 14549-93《电能质量 公用电网谐波》初稿。1993 年国家技术监督局正式颁发了国家标准。GB/T 14549-93 的性质为推荐性国家标准。该标准的正式颁发标志着中国谐波综合治理工作走上了标准化道路。2000 年国家技术监督局将 IEC 61000-3-6 等同采用为国家指导性技术文件 GB/Z 17625.4-2000《中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估》。

GB/T 14549-93 给出了各个等级电力系统电压畸变限值和谐波电流限值。GB/Z 17625.4-2000 中只给出了中、高压电力系统的电压畸变限值, 而没有给出电流畸变限值, 因此 GB/Z 17625.4-2000 评估用户谐波水平仅使用电压畸变限值。

## 2 谐波叠加方法

中低压配电系统是一多谐波源共同作用的系统, 在谐波估算的过程中, 若已知各谐波源相位, 则可直接

接采用谐波潮流的计算方法,进行谐波潮流计算;但有时往往不能实时监测谐波源,只能给出各谐波源的有效值幅值以及电网结构的基本参数。在谐波计算过程中,不可避免将遇到多谐波源共同作用于系统时(谐波源相位未知情况下)谐波电压、电流在系统监测点处(PCC)如何叠加的问题。

GB/T 14549-93规定,两个谐波源的同次谐波电流在一条线路的同一相上叠加,当相位角已知时按照式(2)计算。

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + 2I_{h1}I_{h2}\cos\theta_h} \quad (2)$$

式中,  $I_{h1}$ ——谐波源 1 的第  $h$  次谐波电流, A;

$I_{h2}$ ——谐波源 2 的第  $h$  次谐波电流, A;

$\theta_h$ ——谐波源 1 和 2 的第  $h$  次谐波电流之间的相位角。

当相位角不确定时,可按照式(3)进行计算。

$$I_h = \sqrt{I_{h1}^2 + I_{h2}^2 + K_h I_{h1} I_{h2}} \quad (3)$$

式中,  $K_h$  系数按照表 1 选取。

表 1 系数  $K_h$  的值

h	3	5	7	11	13	9 > 13 偶次
$K_h$	1.62	1.28	0.72	0.18	0.08	0

两个以上同次谐波电流叠加时,首先将两个谐波电流叠加,然后再与第三个谐波电流叠加,依此类推。两个及以上谐波源在同一节点同一相上引起的同次谐波电压叠加的计算与式(2)、式(3)同。

GB/Z 17625.4-2000<sup>[2]</sup>中的谐波叠加原则即 IEC 叠加原则,IEC 有两种叠加法则。下面就第二种叠加法则进行阐述。第  $h$  次合成谐波电压的叠加法则是:

$$U_h = \alpha \sqrt{\sum_i U_{hi}^2} \quad (4)$$

式中,  $U_h$ ——对所考虑的一组谐波源(概率统计值)计算出的(第  $h$  次)合成谐波电压值;

$U_{hi}$ ——要进行合成的各单个谐波电压(第  $h$  次)的值;

$\alpha$ ——一个指数,主要取决于两个因素:①对不超过计算值的实际值所选择的概率值;②各次谐波电压的幅值和相位随机变化的程度。

IEC 叠加原则中对  $\alpha$  的取值进行了如表 2 的说明。

表 2 叠加指数  $\alpha$

谐波次数	$\alpha$
$h < 5$	1
$5 \leq h \leq 10$	1.4
$h > 10$	2

### 3 电气元件谐波计算模型

#### 3.1 变压器三相谐波模型

许多三相变压器都绕在公用铁心上。因此,所有绕组都与其他绕组有耦合关系。任何双绕组三相变压器都可以用两个耦合的复合线圈代表,如图 2 所示<sup>[3,4]</sup>。

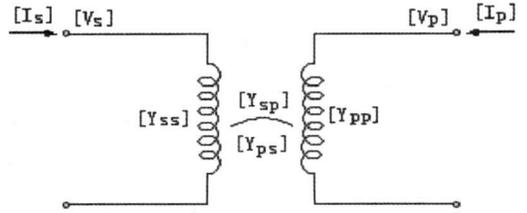


图 2 将双绕组三相变压器看成两个耦合的复合线圈

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(15)中,

$$I_p = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}, V_p = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, V_s = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$Y_{pp}$  与  $Y_{ss}$  为自导纳矩阵,  $Y_{ps}$  与  $Y_{sp}$  为互导纳矩阵,当两个复合线圈为双向耦合时有  $Y_{ps} = Y_{sp}^T$ 。  $Y_{pp}$ 、 $Y_{ss}$ 、 $Y_{ps}$ 、 $Y_{sp}$  均为  $3 \times 3$  阶矩阵。

通常认为变压器的所有三相参数都是对称的。在这种情况下,双绕组变压器的三相接线方式可以由 3 个三阶基本子矩阵构成。在标准变比  $k=1$  的情况下,它们的形式是:

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_1 & 0 & 0 \\ 0 & y_1 & 0 \\ 0 & 0 & y_1 \end{bmatrix}$$

$$Y_2 = \begin{bmatrix} 2y_1 & -y_1 & -y_1 \\ -y_1 & 2y_1 & -y_1 \\ -y_1 & -y_1 & 2y_1 \end{bmatrix}$$

其中,  $y_1 = \frac{1}{z}$ ,  $z$  为变压器基波下低压侧的短路阻抗。

在一般的变压器连接方式中,这些子矩阵与  $Y_{pp}$ 、 $Y_{ss}$ 、 $Y_{ps}$ 、 $Y_{sp}$  的关系列于表 3 中。

高压电力变压器的内部谐振频率远高于谐波渗透研究的频率范围。因此变压器的匝间电容和对地

电容,对研究结果的精确度影响很小,可以忽略。对于由集肤效应造成的变压器铁心损耗增加,可以在电阻与频率的关系中考虑,如式(6)所示。

表 3 双绕组变压器节点导纳矩阵的子矩阵

绕组接线方式		自导纳子矩阵		互导纳子矩阵
P	S	$Y_{pp}$	$Y_{ss}$	$Y_{ps} = Y_{sp}^T$
YN	$Y_n$	$Y_1$	$Y_1$	$-Y_1$
YN	Y	$Y_2/3$	$Y_2/3$	$-Y_2/3$
YN	$\Delta -11$	$Y_1$	$Y_2$	$-Y_3$
Y	Y	$Y_2/3$	$Y_2/3$	$-Y_2/3$
Y	$\Delta -11$	$Y_2/3$	$Y_2$	$-Y_3$
$\Delta$	$\Delta$	$Y_2$	$Y_2$	$-Y_2$

$$Z_{Tn} = \sqrt{h}R_{T1} + jhX_{T1} \quad (6)$$

式中,  $R_{T1}$  是变压器基波电阻;  $X_{T1}$  为变压器基波电抗。

### 3.2 输电线模型

通常可用一  $\Pi$  型等值电路表示三相输电线路,如图 3 所示。

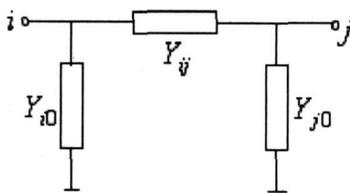


图 3 三相输电线  $\Pi$  型等值电路

如果输电线路是对称排列或是经完全换相的,即是三相对称的。

$$Z_{ij}^{abc} = \begin{bmatrix} Z_s & jx_m & jx_m \\ jx_m & Z_s & jx_m \\ jx_m & jx_m & Z_s \end{bmatrix}$$

$$Y_{ij}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_s & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_s & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_s \end{bmatrix}$$

$$Y_{ij}^{abc} = Y_{ji}^{abc} = j\frac{1}{2} \begin{bmatrix} b_1 + 2h_n & -h_n & -h_n \\ -h_n & b_1 + 2h_n & -h_n \\ -h_n & -h_n & b_1 + 2h_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $Z_s$ ——各相线路计及大地影响的自阻抗;  
 $x_m$ ——各相线路相互间的互感抗;  
 $b_1$ ——为各相线路对地的电(容)纳;  
 $h_n$ ——为各相线路相互间的互电(容)纳。

### 3.3 综合负荷模型

负荷遍及各行各业,各类负荷所占比重随时间也有很大变化,特别是普遍存在的为改善功率因数而装设的静电电容器容量也常有变化,这些使得要准确

定负荷的等值阻抗变得很困难。一般来说,可将它分为电动机类负荷与其他类负荷,按其组成的比例分别计算等值阻抗并予以并联组成综合等值阻抗。其他类负荷近似以电阻性负荷对待,电动机类负荷近似以等值电动机对待。

实际情况下只知道接于系统母线处的综合负荷的基波有功功率和无功功率,应当注意,接于系统母线的并联补偿装置和滤波装置不应该包含在综合负荷中,它们的模型按并联元件进行建模。一般认为,综合负荷对正序电流和负序电流呈相同的阻抗,而对零序电流则呈现很大的阻抗。计算中采用如下导纳矩阵模型。

$$Y = T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & \downarrow \end{bmatrix} T^{-1} \quad (8)$$

式中,  $y$  为综合负荷在基波下的负序导纳。

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } \alpha = 1 \angle 120^\circ.$$

## 4 谐波潮流计算方法

谐波潮流计算步骤如下。

- (1) 设定谐波计算次数  $h$ ;
- (2) 根据谐波次数与电网结构、元件模型,构建  $h$  次谐波下的导纳矩阵  $Y_h$ ;
- (3) 如果已知各谐波源相位,则按照式解算电网本次谐波潮流,进入步骤(5),否则进入未知谐波源相角的计算方式,进入步骤(4);
- (4) 每个谐波源单独作用时,解算电网谐波潮流,得到 PCC 点处注入谐波电流以及谐波电压;按照谐波叠加原则,在 PCC 点处将各谐波源单独作用时的结果进行叠加,作为该点该次谐波潮流计算结果。
- (5) 重新设置需要计算的谐波次数  $h$  进入步骤(1);直到各次谐波下的电网潮流计算均完成,则进入步骤(6);
- (6) 在 PCC 点处计算谐波总畸变率。

## 5 结 论

配电网的三相参数是不对称的,须采用三相谐波潮流模型进行计算。建立的配电网各元件的三相谐

波模型,并系统分析了 GB/T 14549—93、GB/Z 17625.4—2000 对谐波限值以及谐波叠加方法的规定,以此为依据提出了在已知谐波源相位和未知谐波源相位两种情况下的配电网谐波潮流计算步骤。该方法可广泛应用于配电网系统谐波估算中。

### 参考文献

[1] GB/T 14549—1993,电能质量 公用电网谐波 [S].

[2] GB/Z 17625—2000,中、高压电力系统中畸变负荷发射限值的评估 [S].

[3] J Arrillaga D. A. Bradley P. S. Bodger 电力系统谐波 [M].北京:中国矿业大学出版社,1991.

[4] 王猛.电牵引负荷谐波在三相电力系统中的分布与计算 [D].成都:西南交通大学,2003.

[5] George J Walkileh 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计 [M].北京:机械工业出版社,2003.

[6] Task Force on Harmonic Modeling and Simulation “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonic in Electric Power networks”. IEEE Trans [J]. 1996, 11(1): 452—465.

[7] Vinay Sharma R. J Fleming Leo Niekamp “An Iterative Approach for Analysis of Harmonic Penetration in the Power Transmission Networks”. IEEE Trans [J]. 1991, 6(4): 1698—1706.

[8] 张学松,柳焯,于尔铿,等.配电网潮流算法比较研究 [J].电网技术,1998,22(4): 45—49.

(收稿日期:2009—07—07)

(上接第 15 页)

分段试投,避开负荷低谷时段。

4)分析控制软件是否存在缺陷,适当进行修改,避免类似情况发生。

## 6 结 语

目前天广直流运行在定无功功率控制功能方式和自动无功功率控制模式,当要将某小组交流滤波器进行手动操作时,应将该小组交流滤波器操作到非选择状态,然后才能对其进行操作。无功功率控制主要通过投退交流滤波器实现,直流系统将会根据负荷对无功的要求和对谐波的要求而确定正常运行时的滤波器小组数。在闭锁状态,直流站控检测交流滤波器小组的可用数目,如果可用的交流滤波器满足最小配置,直流站控将送一个确认的信号到极控,允许极解锁。在极解锁时,为了过滤交流谐波,将投入一个 A 型和一个 B 型小组滤波器。在无功控制自动模式下解锁时,极控将送一个整流器“解锁”状态信号到直流站控。直流站控将投入下一个 A 型和一个 B 型小组滤波器。如果即将投入的小组滤波器出现故障,则自动投入下一个可用的小组滤波器。在换流器解锁后大约 500 ms 滤波器最小数目配置完成。在解锁状态,如果由于滤波器小组不可用,不能满足正常运行负荷所需求的无功和谐波,将会发出“电流控制”的告警信号,此信号在一定延时之后会将降低电流的信号送到极控,极控收到信号后将会执行降低单极或

双极传输功率命令。因此,要求运行人员密切监视无功功率控制是否在自动模式,各个小组交流滤波器的状态以及交流滤波器投退情况能否满足直流系统的需求,尽量避免由于无功功率控制出问题而引起直流系统降负荷运行和强迫停运情形的发生。同时,特别注意小组交流滤波器检修后的试运行阶段应尽量安排在直流负荷稳定的时段,在试运行期间运行人员要密切其他小组滤波器的自动投退预选情况和自动投退情况是否正常。

### 参考文献

[1] 赵畹君.高压直流输电工程技术 [M].北京:中国电力出版社,2004.

[2] 曹继丰.高压直流输电现场实用技术问答 [M].北京:中国电力出版社,2007.

[3] 2008 浙大直流组.直流输电 [M].北京:电力工业出版社,1982.

[4] Siemens DC station control system information manual (Tianshengqiao Station). Germany Siemens 1999.

[5] Siemens AC filter and DC filter study report performance and rating (Tianshengqiao Station). Germany Siemens 1999.

### 作者简介:

刘洋(1983—),男,吉林人,工学、理学双学士,助理工程师,主要从事高压直流输电的运行和维护工作。

黎张文(1979—),男,广西人,工学学士,助理工程师,主要从事高压直流输电的运行和维护工作。

(收稿日期:2009—08—05)