

# 利用谐波潮流计算程序研究变电站的电流放大问题

余欣梅<sup>1</sup>, 吴耀武<sup>1</sup>, 曹志煌<sup>2</sup>, 熊信良<sup>1</sup>, 张永立<sup>1</sup>, 刘文清<sup>2</sup>

(1. 华中理工大学, 湖北 武汉 430074; 2. 湖南省电力局, 湖南 长沙 410007)

**【摘要】** 文章采用电力系统谐波潮流计算程序来分析变电站的电流放大问题。通过对电力系统谐波电流的计算, 判断变电站并补支路在不同参数配置方案下是否发生谐波谐振, 从而为合理的参数配置提供理论依据。对桂花和滴水井变电站进行的计算表明, 该计算程序是正确和有效的。

**【关键词】** 谐波潮流计算; 电流放大; 谐振; 参数配置

## 1 引言

电力电子技术的飞速发展及其设备在国民经济中愈来愈广泛的应用, 造成了电力系统日益严重的谐波污染。谐波污染常常导致代价昂贵的事故发生, 某些变电站的并联无功补偿电容器因谐波谐振而遭致损坏就是明显的例证。有少数变电站甚至还发生了整组电容器全部烧毁的事故, 因此造成的损失是非常惨重的。

造成电力系统谐波谐振的原因是: 无功补偿电容与电力系统中的电感构成了电感与电容元件并联或串联的回路, 在不同的频率下, 呈现出不同的阻抗性质和数值。当并补装置参数选择不当时, 会使电容与电感在某次或某几次谐波频率下发生谐振。可见, 要避免谐波谐振, 必须合理地设计变电站并补装置的参数, 为并补支路中的电容器与电抗器寻找最佳的配置方案。目前有不少文献<sup>[1][2]</sup>在研究本问题时, 常常将系统简化为单一的电抗, 显然这会带来较大的误差。本文采用电力系统谐波潮流计算程序较为精确地处理系统, 计算出有关变电站并补支路的谐波电流, 根据其大小判断是否发生谐波谐振, 并从不同的方案中找出合理的参数配置, 以避免谐波放大。应用本文提出的方法对湖南桂花和滴水井两变电站作了计算, 计算结果与实测结果完全吻合, 具有较大的实用价值。

## 2 电力系统谐波潮流计算

所谓电力系统谐波潮流计算, 就是通过解网络方程求得电网中各节点(母线)的谐波电压, 进而计算出各支路中的谐波电流。

$$I_n = Y_n U_n \quad (1)$$

式(1)中, 下标  $n$  为谐波的次数,  $I_n$  为各谐波源注入系统的  $n$  次谐波电流列向量,  $Y_n$  为电网的  $n$  次

谐波导纳矩阵,  $U_n$  为电网中各节点的  $n$  次谐波电压列向量。

通过电力系统谐波潮流计算, 可以获得电网中所有节点的谐波电压和所有支路的谐波电流。但在实际工作中, 有时只需知道关键节点的谐波电压和关键支路的谐波电流。如针对变电站谐波放大问题进行谐波潮流计算时, 所关注的是并补支路是否发生谐波放大, 因而只需求出电容支路中的谐波电流即可。下面介绍用于谐波放大问题分析的电力系统谐波潮流计算的数学模型及求解方法。

### 2.1 系统元件的谐波参数计算模型

需要进行谐波参数计算的系统元件有输电线路、发电机、负荷、变压器以及并补电容支路等。限于篇幅, 下面仅就输电线路和并补电容支路的谐波参数计算方法作简要介绍。

例如输电线路:

由于受到高次谐波的作用, 输电线路的分布参数特性比较明显。为了仍能用一个等值型电路代表每一条输电线, 采用了双曲线函数计算谐波参数。输电线的谐波阻抗  $Z_{Ln}$  和谐波导纳  $Y_{Ln}$  为

$$Z_{Ln} = Z_{cn} \operatorname{sh} \gamma_n L \quad (2)$$

$$Y_{Ln} = \frac{\operatorname{ch} \gamma_n L - 1}{Z_{cn} \operatorname{sh} \gamma_n L} \quad (3)$$

式中,  $L$  为输电线的长度,  $Z_{cn}$  和  $\gamma_n$  分别为  $n$  次谐波时输电线的波阻抗和传播常数。

又如并补电容支路:

并补电容支路除含电容器组外, 还串接有起限制合闸涌流作用的电抗器, 如图 1(a) 所示。该支路的谐波等值电路示于图 1(b)。

图 1 中, 电容器的谐波容抗  $X_{cn} = X_{c1}/n$ , 涌流电抗器的谐波电抗  $X_{Ln} = nX_{L1}$ , 涌流电抗器所含内阻的谐波值  $R_{Ln} = \sqrt{n}R_{L1}$ ;  $X_{c1}$ 、 $X_{L1}$  和  $R_{L1}$  分别为电容器的基波容抗、电抗器的基波电抗及电抗器在基波时

所含的内阻。

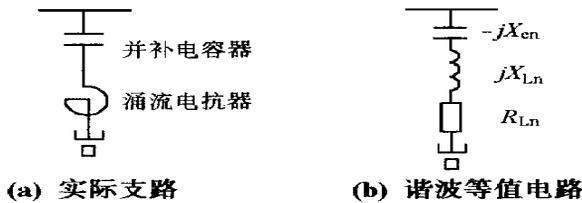


图1 电容支路及其谐波等值电路

## 2.2 网络方程求解

计算出系统中各电气元件的谐波参数后,即可根据电网的接线情况和各支路的导纳值,获得  $n$  次谐波的节点导纳矩阵  $Y_n$ 。 $Y_n$  的形成方法与基波节点导纳矩阵的完全相同,这里不再赘述。

对一个节点数为  $m$  的电力网建立其网络方程为

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1m} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \dots & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n1} \\ V_{n2} \\ \dots \\ V_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{n1} \\ I_{n2} \\ \dots \\ I_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

或简写成

$$Y_n V_n = I_n \quad (5)$$

对于一个给定电力网络,谐波导纳矩阵  $Y_n$  可通过计算形成,而谐波电流列向量  $I_n$  是已知的,则对方程(5)进行求解,不难解得各节点的谐波电压。

为方便求解,首先对导纳矩阵  $Y_n$  求逆得到阻抗矩阵  $Z_n$ ,然后由阻抗形式的网络方程求谐波电压。

$$Z_n I_n = V_n \quad (6)$$

假定电网中总共有 NUM 个谐波源,它们的节点编号分别为  $i_1, i_2, \dots, i_{NUM}$ ,向系统注入的  $n$  次谐波电流分别为  $I_{i1}, I_{i2}, \dots, I_{i_{NUM}}$ 。则由式(6)可以得到各节点的谐波电压为

$$V_k = \sum_{i=i_1}^{i_{NUM}} Z_{ki} I_i \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

## 2.3 变电站并补支路的谐波电流

由式(7)可以获得变电站低压侧母线(即装设并补电容器组的母线)的谐波电压  $V_{cn}$ ,然后由它和并补支路的谐波阻抗  $Z_{cn}$  求电容支路的谐波电流  $I_{cn}$ :  $I_{cn} = V_{cn} / Z_{cn}$ 。

对若干种并补支路的参数配置方案进行谐波电流的计算,根据谐波电流的大小可以判断各种配置方案是否会发生谐波谐振,并从中找出一种或几种合理的参数配置方案。

## 3 实例计算

我们将前述方法编制成计算机程序,并对桂花和滴水井两变电站的谐波电流进行了计算,取得了满意的结果。下面将桂花变电站的实际运行情况及计算结果作一简介。

电压等级为 220kV 的桂花变电站,其 10kV 侧接有 4 条  $\times 6000\text{kVAr}$  并补电容器,4 条并补支路的涌流电抗器均采用 6% 电抗率。1996 年 7 月进行了一次电容器投运试验,试验结果表明:电容器投运时严重放大 3 次谐波,且随着投运组数的增加,谐波电流也逐渐增大,尤其是当投运 3 组电容器时,谐波放大现象最为严重。

将桂花变电站的当前运行参数代入程序中运行,输出结果见表 1。

表 1 桂花变电站的 3 次谐波潮流计算结果

支路号	电抗率	投入不同组支路时的谐波电流(A)			
		1 组	2 组	3 组	4 组
1	6 %	7.6441	14.0098	46.3872	17.6138
2	6 %		14.0098	46.3872	17.6138
3	6 %			46.3872	17.6138
4	6 %				17.6138
谐波电流合计(A)		7.6441	28.0196	139.1615	70.4554
基波电流(A)		325.8760	651.7520	977.6279	1303.5040
谐波电流百分比(%)		2.3457	4.2991	14.2346	5.4051

由表 1 的数据可知,在当前参数配置情况下,该站将在投入 3 条电容支路时发生 3 次谐振,谐振时谐波电流比较大,因此应采取措施加以解决。

改变桂花变电站当前的参数配置,经程序运行并加以多方面的比较后,最终找出的可行方案是将 4 组电抗率都为 6% 的涌流电抗器部分地改为 12%。如采用 12%、6%、6%、6% 电抗率方案时,输出结果见表 2。

表 2 桂花变电站的 3 次谐波潮流计算结果

支路号	电抗率	投入不同组支路时的谐波电流(A)			
		1 组	2 组	3 组	4 组
1	12 %	10.2041	11.5794	13.2863	15.3768
2	6 %		2.5474	2.9229	3.3828
3	6 %			2.9229	3.3828
4	6 %				3.3828
谐波电流合计(A)		10.2041	14.1268	19.1321	25.5253
基波电流(A)		348.0695	673.9455	999.8215	1325.6970
谐波电流百分比(%)		2.9309	2.0961	1.9136	1.9254

由表2的数据可见,采用12%、6%、6%、6%电抗率方案是合适的,不会发生3次谐振,其原因是:电抗率为12%电容支路的加入破坏了原电路的谐振条件,同时它又相当于一个准3次谐波滤波器,其中流过的谐波电流比其它并补支路大许多,但变电站的总谐波电流并未增大。

另外,利用本程序对滴水井变电站也进行了计算,计算结果表明该站没有3次谐波谐振现象,这与实际运行测量结果完全一致。

#### 4 结语

采用本文提出的方法对桂花和滴水井两变电站的当前参数配置进行谐波电流计算,计算结果与实际结果基本吻合,这说明计算结果是正确的。

利用谐波潮流计算方法分析变电站的谐波放大问题,数学模型精度高,可以计算出全系统各次谐波的潮流分布和电流放大现象,且可以实现合理的参数配置,从而避免谐波谐振的产生。这对于延长无功补偿电容器组的寿命、保证电网的安全运行以及

提高电能质量都很有意义。

#### [参考文献]

- [1] 艾敏,曹志煌等. 桂花变电站电容器支路谐波电流放大研究. 水电能源科学, 1999, (4).
- [2] 寇慧珍等. 谐波对山西化工厂10kV补偿电容器运行影响的分析. 电网技术, 1996, (7).
- [3] 宋文南. 电力系统谐波分析. 北京:水利电力出版社, 1995.
- [4] 许克明. 电力系统高次谐波. 重庆:重庆大学出版社, 1991, 9.
- [5] Arrillaga J et al. Power System Harmonics. John Wiley & Sons Ltd, 1985.

收稿日期:1999-05-05

作者简介:余欣梅(1978-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划; 吴耀武(1963-),男,副教授,主要从事电力系统及其自动化专业的教学和科研工作; 曹志煌(1965-),男,高级工程师,主要从事电力系统及其自动化的科研工作; 熊信良(1945-),男,教授,主要从事电力系统及其自动化专业的教学和科研工作。

### APPLICATION OF HARMONIC FLOW CALCULATION TO THE PROBLEM OF CURRENT AMPLIFICATION IN ELECTRIC SUBSTATIONS

YU Xin-mei<sup>1</sup>, WU Yao-wu<sup>1</sup>, CAO Zhi-huang<sup>2</sup>, XIONG Xin-yin<sup>1</sup>, ZHANG Yong-li<sup>1</sup>, LIU Wen-qing<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. The Power Bureau of Hunan Province, Changsha 410007, China)

**Abstract** This paper adopts the method of power system harmonic flow calculation to analyse the problem of harmonic amplification in electric substations. Through calculating the harmonic currents of the compensating condensers branches which are mutual parallel in the substations, we can judge whether the harmonic resonates or not in different cases of parameter configuration, and then the theoretical basis will be provided for the suitable parameter configuration. The calculations about Guihua Substation and Dishuijing Substation are carried out and the results show that the method proposed is correct and effective.

**Keywords** harmonic flow calculation; harmonic amplification; resonance; parameter configuration