

变电站与典型用户谐波分析和抑制软件的开发应用

祝典, 徐永海

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 分析了供用电系统中变电站谐波抑制及无功补偿的特点, 总结了化工类、冶金类和计算机类用户等谐波源负荷谐波发生特点及补偿治理方案, 在此基础上开发了谐波问题分析与抑制的仿真软件。采用所开发的软件, 可仿真计算变电站第三绕组安装滤波器滤除中压侧谐波的滤波效益、补偿效果, 进行滤波前后谐波电流、母线电压和电容器组谐波放大问题分析, 校验电容器安全运行状况; 也可仿真计算化工类、冶金类及计算机类用户谐波发生量及计算其所需补偿无功功率, 进而设计出典型的补偿滤波方案。测试结果表明, 该软件计算准确, 运行稳定, 使用方便。

关键词: 软件; 变电站; 化工; 冶金; 计算机

Development and application of harmonic analysis and suppression software for substation and typical users

ZHU Dian, XU Yong-hai

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The characteristics of harmonic suppression and reactive power compensation in substation are analyzed, and the characteristics of the harmonic generation in chemical industry, metallurgy enterprise and centralized computer users are summarized. A new software is developed for harmonic analysis and suppression for substation and typical users. When the filters are connected to the third Winding of Transformer in substation, the filtering efficiency, the compensation efficiency, the harmonic voltage and current, the capacitor harmonic magnification and its reliable operation can be conveniently analyzed with the software. The quantities of harmonic in chemical industry, metallurgy enterprise and centralized computer users can be calculated, and some typical filters can be designed using the software. Test result indicates the software's reliability, stability and convenience.

Key words: software; substation; chemical industry; metallurgy; computer

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)16-0042-04

0 引言

很多枢纽与重要的变电站中, 用于调压与无功补偿的电容器组一般接在变压器的第三绕组上^[1-3]。但这些变电站中, 谐波源则常常接在变压器的中压绕组侧, 第三绕组安装的电容器组除进行无功功率补偿还应滤除中压侧的谐波^[4,5]。如何合理地进行第三绕组补偿电容器的设计, 使电容器组安全运行并达到较好的滤波效果, 是电力部门非常关心的一个问题, 针对此问题进行分析并开发实用化的仿真软件非常必要。

在各种谐波源中, 化工类、冶金类和计算机类用户产生的谐波问题尤为突出, 对电网和电气设备的安全、稳定和经济运行带来极大影响^[6,7]。为了能够方便地进行这些典型用户的谐波问题分析, 便于谐波源用户申请用电时, 供电部门对其谐波发生水平进行评估并给出初步的谐波治理建议, 对相关问题进行分析并开发相应的软件也具有重要意义。

1 软件的算法模型

1.1 变电站谐波抑制模型

在很多变电站中, 常在变压器低压侧安装滤波器来滤除中压侧的谐波, 但采用这种方式滤波, 与在谐波源处安装滤波器的滤波方式相比, 有其特殊之处: (1) 设计滤波器调谐频次时, 要考虑主变低压绕组及限流电抗器的等效阻抗, 其等效谐波阻抗的存在将会导致滤波器调谐点和并联谐振点发生偏移; (2) 计算系统等效阻抗时, 需将主变高压绕组等效阻抗考虑在内, 其等效阻抗的存在相当于高压短路容量减小; (3) 采用低压侧滤波器滤除中压谐波电流, 因电压等级较低, 滤波器组的工作电流相对较大, 因而滤波装置损耗较大。

软件计算中将主变高压、低压各绕组分别等值成电阻和电感形式, 串联入高压系统侧和低压补偿侧的相应支路, 如图1所示变电站简化分析图。设图中220 kV系统电抗、三绕组变压器高压绕组阻抗、

低压绕组阻抗、低压侧限流电抗器电抗、滤波器组中电容器容抗以及电抗器电抗分别等值为 X_s 、 Z_{TH} 、 Z_{TL} 、 X_K 、 X_C 以及 X_K ；其相应的 h 次谐波阻抗分别为： X_{sh} 、 Z_{THh} 、 Z_{TLh} 、 X_{Kh} 、 X_{Ch} 以及 X_{Kh} 。

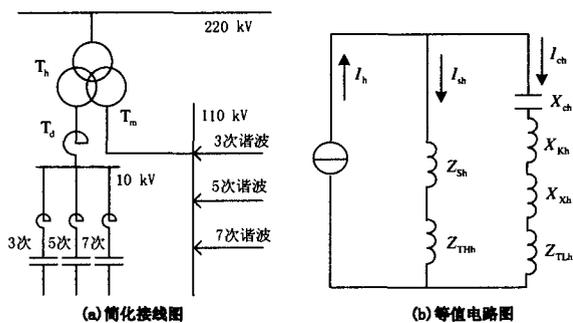


图 1 变电站简化分析图

Fig.1 Analysis figure of a transformer substation

以其中一条滤波支路为例，设滤波器调谐频次为 $h = \sqrt{X_C/X_K}$ ，则对于中压侧谐波源，考虑到 X_X 和 X_{Td} 的影响，其调谐点可用式 (1) 表示，可以看出其相应的调谐频次比滤波器自身的调谐频次低。

$$h_1 = \frac{\sqrt{X_C}}{\sqrt{(X_K + X_X + X_{TL})}} \quad (1)$$

设谐波源 h 次谐波电流为 I_h ，注入主系统的电流为 I_{sh} ，注入电容器组的电流为 I_{Ch} ，则分析图 1(b) 电路可知流入电容器组的谐波电流、流入系统的谐波电流为：

$$I_{Ch} = \frac{hX_s + hX_{TH}}{hX_s + hX_{TH} + hX_K + hX_X + hX_{TL} - X_C/h} I_h = \alpha_{Ch} I_h \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{hX_K + hX_X + hX_{TL} - X_C/h}{hX_s + hX_{TH} + hX_K + hX_X + hX_{TL} - X_C/h} I_h = \alpha_{sh} I_h \quad (3)$$

其中： α_{Ch} 、 α_{sh} 分别称为电容器和主系统的谐波电流分配系数，满足关系式： $\alpha_{Ch} + \alpha_{sh} = 1$ 。

此外，变电站中也常存在两台变压器并联运行的情况，当两台主变出口处母线分列运行或并联运行的情形不同时，仿真计算模型是不相同的。

1.2 化工、冶金及计算机类用户谐波分析依据

化工企业中的电解整流设备属于非线性用电设备，是化工企业中主要的谐波污染源。可对化工类用户按照整流负荷谐波发生情况估算其谐波电流，在理想情况下，整流设备谐波电流含有率可按照式 (4) 计算，其中 p 为整流装置的脉动数， I_1 为基波电流有效值， k 正整数列， $h = pk \pm 1$ 。

$$I_h \approx \frac{I_1}{h} \quad (4)$$

实际上整流所产生的特征谐波含有率与理想情况下含有率有所差异。一般情况下，化工类用户 6 脉动整流负荷其 5、7、11 和 13 次等特征谐波含有率均略低于式 (4) 给定值^[8]；12 脉动整流变所产生的谐波中含有一定量的 5、7 次等次谐波^[9]；18、24 等脉动数谐波电流含有率也与理想值有所差异^[10,11]。软件计算中参照相关文献对化工类用户谐波含有率进行了修正。

中频炉、电弧炉和轧机三类负荷是冶金类用户典型负荷，也是对电能质量影响较为突出的负荷。电弧炉是一种随机变化的非线性负荷，其工作情况复杂，熔化期和精炼期的谐波电流不规则，对交流电弧炉来说，其中 2、3、4、5、6、7 次谐波幅值较大^[8,11]；中频炉也属于整流负荷，其谐波电流含有率与典型整流设备较为接近^[12]；对 6 脉动轧机负荷来说，其 5 次谐波电流含有率通常远大于 20% 的理论值。同时，冶金类用电设备普遍存在无功冲击大，功率因数低，谐波含量大，使电压产生波动和闪变的问题，进行补偿滤波方案设计时需要根据其负荷特点妥善处理。

计算机类用户，考虑其产生谐波的主要负荷为计算机、照明、空调、电梯等类。在谐波电流的估算时，先按照负荷类型分别进行谐波电流的估算，然后再进行叠加，继而估算出总的谐波电流。计算机集中使用的三相四线制低压系统中，常常会因为计算机负荷产生 3 倍次的零序谐波电流而出现零线电流过大的问题^[13,14]。软件中采用公式 (5) 进行零线电流估算。其中 n 为每一相上非线性设备的数量。主要考虑 3 次，9 次和 15 次等三倍次谐波电流。

$$I_0 = n \sqrt{(3I_3)^2 + (3I_9)^2 + (3I_{15})^2 + (3I_{21})^2} \quad (5)$$

2 软件的主要功能特点

软件主要有两方面功能：(1) 为变电站中在主变低压侧安装补偿滤波装置滤除中压侧谐波的滤波形式提供了一个实用化的仿真计算平台：采用此软件可以方便地计算补偿滤波装置的滤波效益、补偿效果，进行谐波电流和母线电压频谱分析，仿真分析电容器是否能够安全运行；(2) 根据化工、冶金和计算机用户负荷情况，软件可对其谐波发生量进行估算，给出初步谐波抑制方案，进行所得经济效益估算。

2.1 对变电站滤波补偿装置仿真计算

a. 可实现单台主变运行时补偿滤波情况的仿

真计算；也可对于两台主变组合运行时，常见运行方式（如变压器高压出口并联、中压侧并联、低压侧分裂；高压、中压和低压侧都分裂等）下补偿滤波情况进行仿真计算。

b. 可仿真计算滤波器组分组投切时串并联谐振情况，计算各次谐波在系统和滤波器组中的放大倍数。

c. 可进行滤波效果计算，分析谐波电流频谱及母线电压频谱，对电容器过电压、过电流与过负荷情况进行校验。

d. 利用软件数据库可将某一工程设计的系统参数、电容器组参数等以工程文件方式保存，执行打开文件操作后，可直接进行“滤波效益与参数校验”工作，从而方便了滤波工程的仿真计算和设计开发。

e. 提供输出打印功能。可以将滤波电容器参数、电抗器参数、滤波效益及过负荷校验等表格以 RTF 文档的形式直接输出；可以将谐波频谱和谐波特性和曲线以图形的形式保存，也可以直接将仿真结果输出打印。

2.2 典型谐波源用户谐波问题分析

a. 可分别根据化工、冶金和计算机用户供电系统可能出现的接线方式，整流变的组合方式以及负荷特点，计算三类用户特征谐波发生量以及母线谐波情况，计算需要补偿的无功功率。

b. 根据化工、冶金及计算机三类用户负荷特性和谐波发生情况，给出其滤波补偿方案初步设计方案，包括滤波器安装位置、补偿滤波方式、滤波支路数以及滤波支路的安装容量。

c. 可对化工、冶金及计算机用户安装滤波器后滤波效果进行分析、计算其基波补偿容量以及补偿后功率因数；可进行滤波器安装投资效益估算。

d. 软件界面多为选择图框，方便用户参数输入；可将某一工程设计的系统参数、用户参数以工程文件形式保存，可将滤波方案以文档形式保存，方便用户下一次访问。

软件采用可视化的开发工具进行开发，用户界面与 Microsoft 系列产品一致。开发的软件平台由多窗口及菜单组成，输入数据方便、界面友好、图文并茂、操作简单。

3 变电站谐波抑制案例分析

汤阴 220 kV 变电站是豫北一座枢纽变电站，有两台 120 kVA 主变，8 条 220 kV 线路和 110 kV 线路，220 kV 和 110 kV 并联运行，10 kV 分裂运行。110 kV 汤牵线是专为电气化铁路牵引变电所供电，

在 10 kV 两段母线上共连接四组无功补偿电容器组，分别为 5C、6C、7C、8C^[16]。

此变电站曾经多次出现因谐波放大而导致电容器损毁的问题，文献[16]对其谐波放大问题进行了分析，建立了相应电容器和变电站模型，计算出谐波阻抗和谐波放大情况。采用汤阴变电站谐波测试数据和系统参数，现利用所开发的软件对汤阴变电站补偿电容器组不同投切情况的谐波特性进行了仿真分析，与文献中相关数据进行了比较。图 2 为 5C、6C、7C、8C 全部投入运行时的阻频特性曲线，表 1 和表 2 将仿真结果中串联谐振点与谐波放大倍数分别与文献计算结果进行了对比。

由图 2 中可直观看到，滤波器有一个较为明显的频点为 4.6 的调谐点，与表 1 中 5C 调谐点相符，可抑制 5 次谐波电流；同时，滤波器与系统有三个并联谐振点，其频点分别为 4.3 次、8 和 15.6 次，其中，7 次和 9 次谐波位于调谐点附近，其谐波电流将会有不同程度的放大，与表 2 中数据相符。

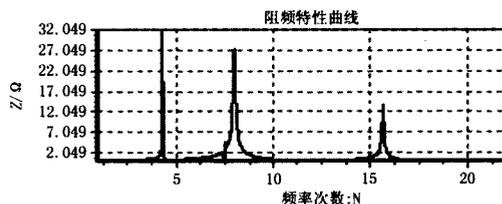


图 2 阻频特性曲线

Fig.2 Impedance-frequency characteristic curves

表 1 串联谐振计算

Tab.1 Calculation of harmonic resonance

电容器组 投切组合方式	串联谐振点	
	文献[16]数据	软件计算结果
5C 投入运行	4.62	4.62
6C 投入运行	16.5	16.5
7C、8C 投入运行	11.77	11.78

表 2 7 次和 9 次谐波电流放大倍数

Tab.2 Magnification of harmonic current

投入 运行的 电容器 组	谐波 次数	谐波放大倍数			
		220 kV		10 kV	
		文献[16] 数据	软件 计算 结果	文献 [16] 数据	软件 计算 结果
5C、6C、7C、 8C	7	2.27	2.27	1.27	1.27
	9	1.39	1.37	2.35	2.36
7C 和 8C	7	2.52	2.55	1.58	1.56
	9	1.79	1.77	2.76	2.76

由表 1 和表 2 结果可知，软件计算数据和文献数据相符；而对比电容器和主系统的谐波电流分配

系数关系式: $\alpha_{Ch} + \alpha_{sh} = 1$ 可知, 220 kV 和 10 kV 的放大倍数代数和应为 1, 可见, 采用所开发的软件计算结果较为准确。

4 结论

软件开发借鉴了笔者以前所开发的“供用电系统谐波滤波与无功功率补偿仿真软件”^[17], 在以前软件基础上加入了变电站补偿装置特性仿真分析和典型用户谐波问题分析, 使得谐波分析仿真软件功能更加丰富和完善。

采用所开发的软件对汤阴变电站补偿滤波装置进行了仿真计算, 结果证实了软件的正确性。软件可运用于变电站及化工、冶炼和计算机类典型用户谐波分析与滤波方案设计, 通过对各种滤波方案的比较得出经济、合理的设计方案, 对改善电网供电质量、节省电能、提高用电设备出力均可起到积极作用。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning, HAN Min-xiao, XU Yong-hai, et al. Analysis and Control of Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 吴竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WU Jing-chang. Distribution System Harmonic[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [3] 许遐, 蔡维, 李学信. 电铁供电站高次谐波滤波兼无功补偿装置的设计[J]. 华北电力技术, 2002, (12): 6-9.
XU Xia, CAI Wei, LI Xue-xin. Design of Higher Harmonics Filtering and Reactive Compensating Devices in Substation for Electric Locomotives[J]. North China Electric Power, 2002, (12): 6-9.
- [4] 唐敏, 李群湛, 贺建闽. 牵引变电所无功谐波综合补偿方案研究[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 47-52.
TANG Min, LI Qun-zhan, HE Jian-min. Structure of Hybrid Power Filter for Reactive Power and Harmonic Currents in Traction Substation[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 47-52.
- [5] 周胜军, 林海雪. 并联电容器装置中的串联电抗器选择[J]. 供用电, 2001, 18(5): 15-18.
ZHOU Sheng-jun, LIN Hai-xue. Choice of Series Reactance for Shunt Connected Capacitor Banks[J]. Power Supply and Consumption, 2001, 18(5): 15-18.
- [6] 肖湘宁, 徐永海. 电力系统谐波及其综合治理[J]. 中国电力, 1998, 31(4): 59-61.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai. Problems and Comprehensive Control of Power System Harmonic[J]. Electric Power, 1998, 31(4): 59-61.
- [7] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai. Power Quality Analysis and Its Development[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 66-69.
- [8] 张一工, 肖湘宁. 现代电力电子技术原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHANG Yi-gong, XIAO Xiang-ning. The Principle and Application of Modern Power Electronic Techniques[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 徐政, 译. 电力系统谐波[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
XU Zheng, Trans. Power System Harmonics[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [10] 国际铜业学会. 电能质量应用指南[Z]. 2006.
- [11] 裴林, 刘英亮, 王剑. 齐鲁石化 35 kV 电网谐波的分析 and 治理[J]. 山东大学学报(工学版), 2003, 33(5): 585-588.
PEI Lin, LIU Ying-liang, WANG Jian. The Analysis and Treatment of the 35 kV Power Grade Harmony Waves of Qilu Petrol and Chemical Co. Limited[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2003, 33(5): 585-588.
- [12] 张玉成, 杜明哲. 中频电炉谐波分析与抑制[J]. 华中电力, 2006(1): 30-32.
ZHANG Yu-sheng, DU Min-zhe. Harmonic Analysis and Suppression of Medium Frequency Electric Boiler[J]. Central China Electric Power, 2006(1): 30-32.
- [13] 高山. 关于计算机负载对电能计量影响的探讨[J]. 华北电力技术, 2001, (9): 12-13.
GAO Shan. On Effects of Computer Load to Electric Energy Measurement[J]. North China Electric Power, 2001, (9): 12-13.
- [14] Moore P J, Portugues I E. The Influence of Personal Computer Processing Modes on Line Current Harmonics[J]. 2003, IEEE.
- [15] 张直平, 等. 城市电网谐波手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
ZHANG Zhi-ping. Harmonic Brochures of Urban Distribution Network[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [16] 王绪雄. 变电站补偿电容器的谐波问题研究(硕士学位论文)[D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
Study on the Harmonic Problems in Substation Compensation Capacitors, Thesis[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2003.
- [17] 徐永海, 金炎, 等. 供用电系统谐波滤波与无功补偿仿真软件[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 93-95.
XU Yong-hai, JIN Yan, et al. Simulation Software of Harmonic Filter and Reactive Power Compensation for Distribution System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 93-95.

收稿日期: 2007-02-03

作者简介:

祝典(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制、电力系统谐波分析与综合治理; E-mail: xiaolaoshu_zhu1@163.com

徐永海(1966-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统谐波、电能质量等方面的研究工作。