

# 基于 ETAP PowerStation 的海上平台电力系统谐波分析

余颖<sup>1</sup>, 王新刚<sup>2</sup>

(1. 中国海洋石油工程股份有限公司设计公司, 天津 300452;

2. 防灾科技学院, 北京 065201)

**摘要:** 随着海上平台谐波污染问题日趋严重, 谐波分析和抑制已成为海上平台电力系统设计运行必须研究的重要课题。而通过电力系统分析仿真软件去对系统进行谐波分析研究已逐渐成为电气工程师的主要应用工具。首先概述电力系统谐波分析的特点及主要抑制手段, 随后介绍强大的电力系统分析仿真软件 ETAP PowerStation 的功能特点, 并通过具体实例, 介绍如何采用 ETAP PowerStation 对系统进行谐波分析和滤波器选型预测。

**关键词:** 谐波分析; ETAP PowerStation; 电力系统; 滤波器; 海上平台

## Harmonic analysis of offshore platform power system based on ETAP power station

YU Ying<sup>1</sup>, WANG Xin-gang<sup>2</sup>

(1.China Offshore Oil Engineering Co.,Ltd, Tianjin 300452, China; 2.Institute of Disaster-Prevention of

Science and Technology, Beijing 065201, China)

**Abstract:** With the more and more serious harmonic pollution, it has become an important task to analyze and restraint harmonic on offshore platform power system's design and run. Simulation software has gradually been the main method used by electrical engineer to analyze and study harmonic in power system. The paper outlines the characteristic and main restraint method of power system harmonic analysis, then introduces the characteristic of ETAP Powerstation which is a formidable power system analysis simulation software, how to use ETAP Powerstation to carry on harmonics analysis to power system and forecast the filter's types are put forward at last.

**Key words:** harmonic analysis; ETAP PowerStation; power system; filter; offshore platform

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)01-0063-05

## 0 引言

近些年, 随着海上平台规模的不断扩大, 电潜泵采油和大型钻机的交流变频驱动中变频器的广泛应用给海洋石油工程带来了巨大的收益的同时, 也带来严重的谐波污染<sup>[1,2]</sup>。谐波污染大大增加了电网中发生局部的并联或者串联谐振的可能, 使谐波电流放大几倍甚至几十倍, 产生过电压或过电流, 对继电保护、计算机、测量和计量仪器以及通信系统等都有不利和不可预知的影响。近几年谐波畸变所引起的海上平台变压器过热、仪表数据波动、电容器过载损坏等现象已日渐引起设计工作者的关注和警觉, 谐波分析和抑制成为海上平台电力系统设计和设定继电保护参数时所必须考虑的重要课题。

海上平台电力系统规模不断扩大使得应用强大的电力系统分析仿真软件<sup>[3,4]</sup>协助进行电力系统分析成为必然趋势。ETAP 是美国 OTI 公司开发的一个高级电力系统应用软件, 采用它对电力系统进行谐波分析和滤波器选型是非常方便而且可靠的<sup>[5]</sup>。目前, 国内对 ETAP Powerstation 软件的应用尚未普及, 了解如何采用 ETAP Powerstation 软件进行电力系统谐波分析具有一定的实用意义。

本文首先对电力系统谐波的现状 & 主要抑制手段进行概述, 随后介绍 ETAP Powerstation 软件的功能和谐波程序的主要内容, 最后通过具体实例, 介绍如何采用 ETAP Powerstation 对系统进行谐波分析计算, 并确定滤波方案和估计滤波器选型。

## 1 谐波分析及抑制手段

### 1.1 谐波分析

谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍,通常谐波也称高次谐波。法国 J. B. Fourier 提出的傅立叶分析是一种研究和分析谐波畸变的有效方法<sup>[6]</sup>。理论上任何周期性函数都可分解为傅立叶级数,即含有基波频率和一系列为基波倍数的谐波的正弦波分量,每个谐波都具有不同的频率、幅度与相角。谐波产生的根本原因是由于非线性负载所致。当正弦基波电压施加于非线性负载时,设备吸收的电流与施加的电压波形不同,电流因而发生了畸变,由于负荷与电网相连,故谐波电流注入到电网中,这些设备就成了电力系统的谐波源。系统中的主要谐波源可分为两类:含半导体的非线性元件,如各种整流设备、变流器、交直流换流设备、PWM 变频器等节能和控制用的电力电子设备;含电弧和铁磁非线性设备的谐波源,如日光灯、交流电弧炉、变压器及铁磁谐振设备等。

海上平台是将海底油(气)藏中的原油或天然气开采出来,经过采集、油气初步分离与加工,短期的储存,装船运输或经海管外输的主要设施。早期由于电力系统规模和结构较为简单,谐波问题并没得到足够重视。然而,近几年变频器等非线性负荷的广泛应用使谐波分量迅速增长,导致海上平台电力系统谐波水平逐年升高,使谐波分析和抑制成为海上平台电力系统设计和安全运行所必须考虑的一项新的课题<sup>[7,8]</sup>。海上平台电力系统的谐波分析计算主要就是以变频器作为系统的谐波电流源来进行分析研究的。

### 1.2 谐波分析指标

在电力系统的谐波分析中,不仅要分析系统中存在哪些谐波源及其特性,更重要的是要分析系统在谐波状态下所反映的特性。谐波分析计算用来检查非线性设备对系统的影响以及系统在特定情况下的谐波情况,计算的目的是找出谐振点和计算畸变因数并分析谐波对系统的影响情况。

谐波分析主要分为两个方面:一个是阻抗扫描,又称为频率扫描,得到待研究母线输入端阻抗的模值与谐波次数或频率之间的关系曲线,该曲线对找出谐振点是很有用的,阻抗值的突然上升标志并联谐振,而阻抗值的突然降低表示串联谐振;另一个是谐波潮流计算,其得到的是线路电流和母线电压的基波值和谐波值。无论是频率扫描还是谐波潮流计算都需要在求出网络谐波节点导纳阵后,根据网络方程求解各节点的谐波电压。

通过谐波分析可以检验电力系统中的电压电流波形畸变是否在允许的范围内、所投入的电力设备是否会引起电网谐振或谐波电流的放大,从而尽可能避免谐波引起事故。通过频率扫描,谐波潮流计算可以选择合适的滤波器,使其对电网的谐波污染控制在国家标准范围之内。

评价谐波畸变率的参数主要有两个:

1) 谐波含有率 IHD (Individual Harmonic Distortion)

工程上常要求给出电压或电流畸变波形中某次谐波的含有率,以便监测和采取抑制措施。电压畸变波形和电流畸变波形的第  $n$  次谐波含有率分别为:

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (2)$$

其中:  $U_n(I_n)$  为第  $n$  次谐波电压(电流)有效值;  $U_1(I_1)$  为基波电压(电流)有效值。

实际工作中对谐波含有率常以频谱(幅频特性)来表示。

2) 总谐波畸变率 THD (Total Harmonic Distortion)

THD 为各次谐波有效值的平方和的方根值与其基波有效值的百分比,简称畸变率 DF (Distortion Factor)。

电压的总谐波畸变率为:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \times 100\% \quad (3)$$

电流的总谐波畸变率为:

$$THD_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \times 100\% \quad (4)$$

通常规定低压供电电压的畸变率不得超过 5%,这个标准符合工业供电的电压波形,近似认为是实际上的正弦波形。

### 1.3 谐波抑制的手段

谐波的补偿和抑制是谐波研究的核心问题<sup>[9]</sup>。抑制谐波不仅对净化电网环境、提高电能质量具有十分重要的意义,还对电力电子技术自身的发展具有巨大的推动作用。目前海上平台抑制谐波的手段主要有以下四种:

1) 变压器以不同的方式联接。海上平台的变压器一般采用  $\Delta/Y$  联接,可以消除 3 次和  $3n$  次谐波。

2) 从源头入手,改善谐波源的特性。主要是在大容量变压器中采用多重化技术,提高整流器的脉数由 6 脉动增高为 12 脉动,可以削减 5 次和 7 次谐波。但由于 12 脉动整流器的成本较高,因此目前仅在少数海上平台采用。

3) 无源滤波器。针对谐波问题,传统方法是采用由一组或数组 LC 单调谐滤波器组成,有时再加一组高通滤波器,它是由电容器、电抗器和电阻器适当组合而成。该装置与谐波源并联,除起旁路滤波作用外,还兼顾无功补偿的需要,其结构简单、成本低,是当前补偿谐波最主要的手段,也是海上平台抑制谐波的主要途径。

4) 有源电力滤波器。目前,谐波抑制的一个重要趋势是采用有源电力滤波器 APF(Active Power Filter)。这种滤波器能对频率和幅值都变化的谐波进行跟踪补偿,且补偿特性不受电网阻抗的影响,既可以对一个谐波和无功源单独补偿,也可以对多个谐波和无功源集中补偿,因而受到重视。我国在这方面的研究起步较晚,而且 APF 的成本较高,因此在海上平台实用还较少,仅少数海上平台在经费允许的情况下采用有源滤波方式。

## 2 ETAP Powerstation 软件的谐波分析

### 2.1 ETAP Powerstation 概述

ETAP(Electrical Transient Analysis Program) Powerstation 是由美国 OTI 公司(Operation Technology, Inc.)开发的第一个真正 32 位 Windows 环境下全图形界面的电力系统仿真分析/计算高级应用软件。ETAP PowerStation 提供完整的图形和编辑器,以最简洁的方式建立单线图。利用单线图的编辑工具条,可以图形化地增加、删除、移动或联接设备;放大或缩小;显示或隐藏网络;改变设备大小、方向、符号或显示方法;输入设备属性;设置运行状态等。可以按照不同的连接方式、不同的运行要求、不同的负载状况、不同的电气工程参数、不同的计算参数等来设置或改变系统运行状态,并在此基础上进行各种计算与分析<sup>[10]</sup>。

ETAP PowerStation 的计算分析设计模块种类繁多,功能强大。包括潮流计算、短路计算、电机起动、暂态稳定、最优潮流、谐波分析、可靠性分析、直流系统分析、地下电缆系统、变电站接地和

继电保护配合等分析计算功能。另外,随着 OTI 公司在 PowerStation 为基础开发的 PSMSTM 实时在线电力系统软件在工程方面的应用,使得设计软件、工程设备软件、运行管理软件走向统一,使得设计、设备制造、用户管理三者之间的工作可在一个软件平台进行。

### 2.2 ETAP Powerstation 谐波分析

ETAP PowerStation 的谐波分析程序遵从 IEEE 519 标准。它包含的谐波分析程序可实现谐波潮流分析、谐波共振和频率扫描分析;可对电压电流总 RMS 值、电压电流总合成峰值、谐波失真度进行分析;可结合系统对谐波的要求,模拟电压和电流谐波源,定义频率扫描范围;可进行滤波器设计,分析发电机和变压器饱和、谐波失真限制、通信干扰系数等;可绘制出多种形式的响应曲线,如绘制所选设备的电压或电流波形图,电压或电流谐波频谱图,谐波频率扫描图形分两种,即母线输入阻抗幅值图与母线输入阻抗相角图。

ETAP PowerStation 谐波潮流分析首先进行一个基波时的潮流计算。基本潮流计算结果为以后谐波指数计算提供基波母线电压和支路电流。然后对每个系统中的谐波源的谐波频率进行潮流计算。计算中考虑到的是低频,如 2 次谐波到 15 次谐波,加上 17 次到 73 次的特性谐波。设备阻抗根据谐波频率和设备类型进行调节。对于 3 的倍数次谐波,零序阻抗根据实际频率和零序网进行调节。谐波潮流分析的文本输出报告显示系统输入数据、基本潮流计算结果、系统谐波信息和母线电压和支路电流列表以及所有的谐波内容。这些结果也可通过谐波潮流滑条和谐波显示选项编辑器直接在单线图中进行查看。同时,母线电压和支路电流也以图形的形式显示其波形,并可显示谐波频谱。

谐波滤波器用于减轻谐波问题。一个设计正确的滤波器可以阻止谐波电流流入系统,或在共振频率上设置一个小阻抗路径来阻止共振现象。ETAP 谐波滤波器编辑器提供所有实用滤波器结构以供选择。在该滤波器中对单调滤波器设有一个滤波器规格程序,用户可用它在不同配置和操作标准基础上优化滤波器参数。

### 2.3 应用实例

下面以某电力系统为例,运用 ETAP Powerstation 软件进行系统建模和谐波分析,并设计滤波方案,选择滤波器,观察滤波结果。

#### 2.3.1 建模

该系统中分为四个电压等级, 有五个母排 Bus1(44 kV)、Bus2(13.8 kV)、Bus3(4.16 kV)、Bus4(4.16 kV)、Bus5(0.48 kV)。该系统由 1500 MVA 的电网供电, 并将电能送到系统中, 包含有四台主变压器, Bus2(13.8 kV)和 Bus3(4.16 kV)侧均有一组 400 kvar 电容器, Bus5(0.48 kV)侧的是两个变频驱动装置(VFD)驱动电机。该软件含有 ABB、Rockwell、Typical 等各种谐波源类型及用户可扩展的谐波源库, 本文选择 ABB 公司的 6 脉冲的谐波源类型。图 1 为采用 ETAP Powerstation5.0 所建立的模型。

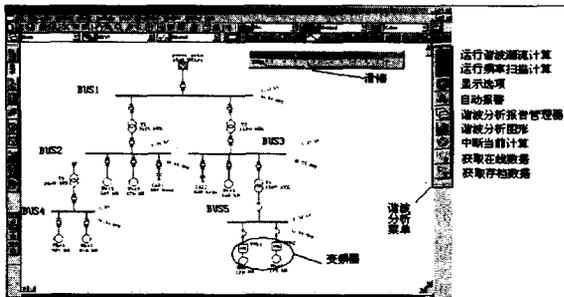


图 1 电力系统模型

Fig.1 Power system model

### 2.3.2 谐波分析

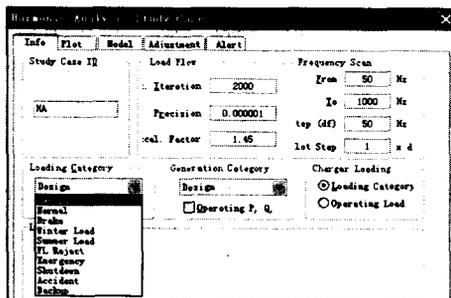


图 2 谐波分析案例编辑器

Fig.2 Harmonic analysis study case editor

ETAP Powerstation5.0 的谐波分析首先要通过谐波分析案例编辑器来进行谐波计算参数的设定, 参数包括精度控制变量、系统负荷条件、报告选项、谐波源模型选项等。因该系统的工频(即基波)为 50 Hz, 而通常考虑的谐波影响为 20 次左右, 因此将频率扫描范围(Frequency Scan)设定为 [50 Hz, 1000 Hz], 并将频率步长设定为 50 Hz。最大迭代次数(Max. Iteration)、精确度(Precision)和加速因子(Accel. Factor)均是谐波潮流计算的基本参数, 即潮流计算迭代到最大迭代次数时仍无法

收敛到精确度, 则程序停止计算。本例选用软件缺省值, 最大迭代次数是 2000, 精确度是 0.000 001, 加速因数是 1.45。此外, 软件还提供负荷条件(Loading Category)的选择, 有十种负荷类型, 本例均按照设计负荷(Design)进行计算。在案例编辑器的模型(Model)和绘图(Plot)属性页, 可设定谐波源类型及谐波潮流和频率扫描的分析参数。图 2 为本案例在编辑器中的参数设定值。

ETAP Powerstation5.0 的谐波分析主要是进行谐波潮流计算和频率扫描计算, 其分析计算按钮均在图 1 的谐波分析工具栏中。运行谐波潮流计算的结果显示在单线图上, 图 1 中的滑棒可以用鼠标滑动, 观察各次谐波畸变率的数值和角度, 并可通过完整的文本报告和谐波分析波形进行查看。在本文实例中, 因为谐波源位于 Bus5, 该系统的谐波影响多在 Bus3 和 Bus5 部分, 主要为 5、7 次谐波, 通过查看计算报告, Bus3 的 THD 是 12.05%, Bus5 的 THD 是 14.90%, 远超出限值。图 3 为 Bus3 和 Bus5 的波形图, 其中纵坐标为 Voltage(%), 是相对母线额定电压的百分比, 横坐标是以周期为单位的 Time(cycle), 可以看出发生严重的畸变。

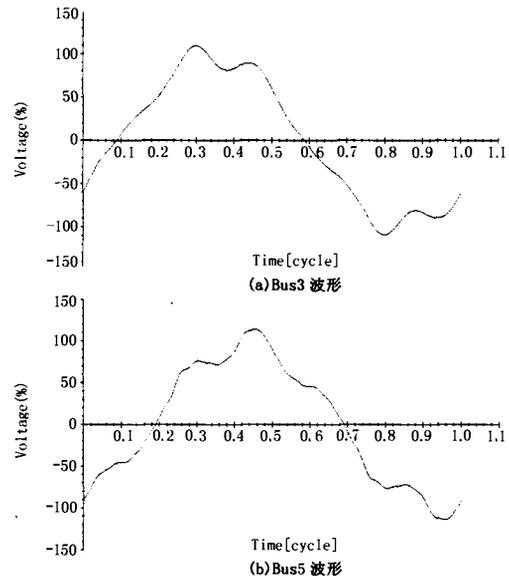


图 3 Bus3、Bus5 谐波分析波形

Fig.3 Harmonic analysis wave

### 2.3.3 滤波方案

ETAP 提供的滤波器包括旁路、高通(带滞后)、高通(不带滞后)、单调滤波器等多种类型, 滤波器 LC 参数可以通过输入谐波电流和所需滤波后的功

率因数直接计算,给谐波分析带来极大方便。

根据上述谐波分析结果表明,由于谐波源在 Bus5 母排上,因此该处的谐波畸变率最严重,所以最为合理的滤波方案是将滤波器放在 Bus5 上。此外,采用 6 脉波整流装置时,其电流谐波含量很大,谐波成分较复杂,谐波畸变主要是 5、7 次谐波和高次谐波的综合,因此确定使用 5、7 次单调滤波器和高通滤波器共同进行滤波。

ETAP 可以通过谐波电流 (Harmonic Current)、当前功率因数 (Existing PF)、需要到达的功率因数 (Desired PF) 和当前负载的容量 (Load MVA) 直接计算出滤波器的 LC 参数,而这些参数在完整的谐波分析报告中均能查找到。将上述参数输入图 4 左侧的滤波器设置对话框中,点击设置滤波器 (Size Filter),则系统会在图 4 右侧的滤波器编辑对话框中自动计算出各次滤波器的 LC 参数值来。

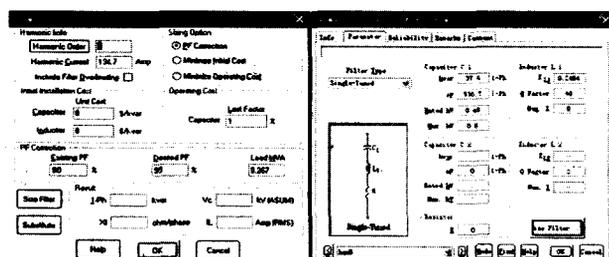


图 4 滤波器选型

Fig.4 Filter selection

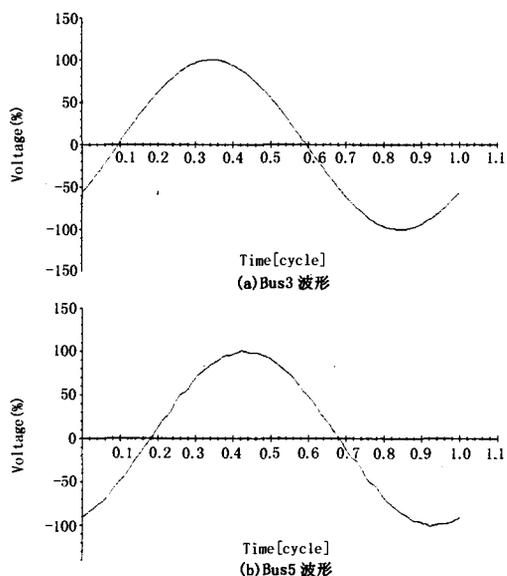


图 5 滤波后 Bus3、Bus5 波形

Fig.5 Bus3 and Bus5 wave after filtering

图 5 为滤波结果,滤波后 Bus3 的 THD 是 0.3%, Bus5 的 THD 是 1.12%, 波形满足工程要求。通过分析,可以直接以软件计算的滤波器参数值做为工程选型的参考标准。

### 3 结论

海上平台电力系统由于变频器、整流器等非线性负荷的广泛应用使得谐波污染问题日趋严重,谐波分析和抑制已成为海上平台电力系统设计运行必须研究的重要课题。本文在概述电力系统谐波分析的特点及主要抑制手段的基础上,介绍强大的电力系统分析仿真软件 ETAP Powerstation,通过具体实例,详细介绍如何采用 ETAP Powerstation 对系统进行谐波分析和滤波方案仿真。ETAP Powerstation 软件的整个谐波分析和计算过程简单方便,计算仿真结果直观、准确,滤波方案的确定和仿真可以确定滤波器的型号和观察滤波效果。总之,应用 ETAP Powerstation 电力系统软件对系统进行谐波分析可显著地提高工作效率和质量,也帮助用户节省了大量的系统设计和运行费用,能令使用者的分析和研究事半功倍。

### 参考文献

- [1] 安建钧. 石油钻机直流电驱动系统的谐波影响及其解决方案[J]. 电气传动自动化, 2002, 24(4): 17-18. AN Jian-jun. Harmonic Influence and Resolvents on DC Electric Drive System of Oil Drilling Rig[J]. Electrical Drive Automation, 2002, 24(4): 17-18.
- [2] 刘峰. 石油化工企业电力系统谐波的监测和滤波[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(4): 36-38. LIU Feng. Monitoring and Filtering of Power System Harmonic Wave for Petrochemical Enterprise[J]. Electrical Drive Automation, 2003, 25(4): 36-38.
- [3] 芦晶晶. 电力系统谐波分析及程序开发 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005. LU Jing-jing. Harmonic Analysis and Programs-development in Power System[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.
- [4] 凌卫家, 吕东晓, 戴江江, 等. 面向用户的电力系统模拟计算高级应用软件 [J]. 湖北电力, 2002, 26(2): 33-35. LIN Wei-jia, LI Dong-xiao, DAI Jiang-jiang, et al. User-oriented Software for the Simulating Calculation of Power System[J]. Hubei Electric Power, 2002, 26(2): 33-35.
- [5] ETAP PowerStation 5.0 用户手册 [Z]. Operation Technology, Inc. 2005. ETAP Power Station 5.0 User Handbook[Z]. Operation Technology, Inc. 2005.

综上所述,自并励磁系统具有接线简单、主轴系短、造价低、运行维护方便、反应速度快等明显特点,已被国内外推荐为大型发电机组的首选励磁方式。

从我院设计的各电厂的实际运行情况看,自并励磁系统事故率远低于无刷励磁系统,电厂运行管理人员欢迎使用自并励磁系统。

### 参考文献

- [1] GB/T7409. 1997, 同步电机励磁系统[S].  
GB/T7409. 1997, Excitation System for Synchronous Electrical Machines[S].
- [2] DL/T0650-1998,大型汽轮发电机自并励静止励磁系统技术条件[S].  
DL/T0650-1998,Specification for Potential Source Static Exciter Systems for Large Turbine Generators[S].
- [3] DL/T 843-2003,大型汽轮发电机交流励磁机励磁系统技术条件[S].

- DL/T 843-2003,Specification for A C Exciter Rectifier Excitation System for Large Turbine Generators[S].
- [4] 张蓉. 发电机组励磁系统技术改造[EB/OL]. 电力世界网.  
ZHANG Rong. Technical Renovation of the Power Supply Unit's Excitation System[EB/OL]. www.electricpower.cn.
- [5] DeMello F P, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control[J]. IEEE on PAS,1969,88(4).
- [6] Proke D, Sun Y, LU Xiong, et al. Nonlinear H $\infty$  Excitation Control[Z]. CSSPP'97,1997.

收稿日期: 2006-07-31; 修回日期: 2006-09-06

### 作者简介

陈利芳(1975-),女,工程师,本科,主要从事发电厂及变电站二次设计工作;E-mail: chenlifang@gedi.com.cn  
陈天禄(1978-),男,大专,主要从事一、二次变电设备的维护及试验工作。

(上接第 67 页 continued from page 67)

- [6] Wakileh G J. 电力系统谐波—基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政,译. 北京:机械工业出版社,2003.  
Wakileh G J. Power System Harmonic Fundamentals, Analysis and Filter Design[M]. XU Zheng, trans. Beijing: China Machine Press,2003.
- [7] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [S].
- [8] Xu W, Marti J R, Dommel H W. Harmonic Analysis of Systems with Static Compensators [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 183-190.
- [9] 钱照明,叶忠明,董伯藩. 谐波抑制技术[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(10): 48-54.  
QIAN Zhao-ming, YE Zhong-ming, DONG Bo-fan.

Harmonic Suppression Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(10): 48-54.

- [10] 冯煜理,王雷,陈陈,等. 电力系统仿真软件 ETAP 的特性与功能简介[J]. 供用电, 2005, 22(5): 23-26.  
FENG Yu-cheng, WANG Lei, CHEN Chen, et al. Synopsis about Characteristic and Function of Electric Power Systems Simulation Software ETAP [J]. Distribution & Utilization, 2005, 22(5): 23-26.

收稿日期: 2006-06-30; 修回日期: 2006-10-14

### 作者简介

余颖(1972-),女,电气工程师,硕士,主要研究方向为海上平台电力系统设计研究,模式识别与智能系统研究。  
E-mail: yuer\_033@sina.com

(上接第 80 页 continued from page 80)

随着经济的快速发展,由于众多的家用电器和电弧炉等非线性负荷的不断增多和容量增大,电力系统中的谐波水平日益提高,由谐波引起的系统谐振所产生的过电流、过电压对电力系统的安全运行带来的危害不容小视,开展预防和抑制谐波谐振方面的研究,对于电力系统的安全运行意义重大。

### 参考文献

- [1] 吕润余. 电力系统高次谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
Lü Run-yu. High Frequency Harmonic of Electric Power Systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [2] 董振亚. 电力系统的过电压保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1997.  
DONG Zhen-ya. Overvoltage's Protection of Electric Power Systems[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power

Press, 1997.

- [3] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.  
CHEN Wei-xian. A Tutorial on Overvoltage of Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [4] 张纬敏,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
ZHANG Wei-po, HE Jin-liang, GAO Yu-ming. Overvoltage's Protection and Insulation Coordination[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002

收稿日期: 2006-07-01; 修回日期: 2006-11-05

### 作者简介

董国震(1973-),男,高级工程师,硕士研究生,从事电力系统运行设备试验、检测研究; E-mail: zhen3183@Yahoo.com.cn

和敬涵(1964-),女,副教授,从事电力系统稳定控制、在线监测与智能管理研究。