

# 油田配电系统谐波抑制技术应用与展望

王 军

大庆油田有限责任公司第一采油厂生产保障大队, 黑龙江大庆 163000

**摘要** 随着电力电子设备在油田配电系统中的广泛应用, 配电网的波形畸变日益严重, 进而危害到电气设备的正常运行及电力系统的可靠性。分析了油田配电系统的特点, 认为谐波产生的根本原因是钻采系统与油气集输系统采用大量非线性负载所致, 其危害主要是降低设备的使用寿命和工作效率; 分析了当前主要采用的几种谐波治理方法, 包括安装电抗器、安装无源电力滤波装置、安装有源电力滤波装置、安装有源滤波+无源滤波装置等的特点, 并对几种滤波技术进行了对比; 介绍了采用有源滤波器实现电力系统谐波动态抑制的发展过程, 并对油田配电系统谐波动态抑制技术的发展进行了展望。

**关键词** 配电系统; 谐波; 有源滤波器; 动态抑制

中图分类号 TM732

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.019

## Application and Prospect of Harmonic Suppression Technology in Oilfield Electric Distribution System

WANG Jun

No. 1 Oil Production Company Production Guarantee Team, Daqing Oilfield, PetroChina, Daqing 163000, Heilongjiang Province, China

**Abstract** With the wide application of the power electronic equipment in the oilfield electric distribution network, the waveform distortion of the grid becomes increasingly serious and damaging to the normal operation of the electrical equipment and the power system reliability. Based on the characteristics of the oilfield electric distribution network and the basic theory of the harmonic analysis, this paper gives a brief introduction to the causes and damages of harmonic waves in the oilfield electric distribution system, the harmonic control method and the filtering techniques are compared, and the development process of the Harmonic Dynamic Suppression technology using the active filter in the oilfield electric distribution system is discussed. Finally, the prospect of the development of the Harmonic Dynamic Suppression in the oilfield electric distribution system is commented.

**Keywords** power system; harmonics; active power filter; dynamic suppression

### 0 引言

近几年, 大庆油田配电网经常出现不明原因的电力设备烧毁、电缆及绝缘子击穿、低压计量系统异常、自控系统误动、无功补偿装置损坏无法运行等问题, 通过对配电系统测试数据进行分析, 发现故障产生的主要原因是系统局部谐波含量超标, 其中超过 75% 安装变频器的站、岗及部分变电所馈出线谐波超标严重<sup>[1]</sup>。

谐波是指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。即对于周期为  $T=2\pi/\omega$  的非正弦电压  $U(\omega t)$  或非正弦电流, 在满足狄里赫利条件下, 可分解为傅里叶级

数:

$$U(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

式中, 频率为  $n\omega$  ( $n=2, 3, \dots$ ) 的项即为谐波项。国际上对电力谐波问题的研究大约起源于 20 世纪 50 年代, 当时的研究主要针对高压直流输电技术中变流器引起的电力系统谐波问题。进入 20 世纪 70 年代后, 随着电力电子技术的发展及其在工业、交通及家庭中的广泛应用, 谐波问题日趋严重, 从而引起世界各国的高度重视。中国国家技术监督局于 1993 年颁布了国家标准《GB/T 14549—93 电能质量公用电网谐波》, 标

收稿日期: 2012-09-12; 修回日期: 2012-09-24

作者简介: 王军, 工程师, 研究方向为油田地面工程优化与节能, 电子信箱: dq8900@126.com

准给出了公用电网谐波电压、谐波电流的限制值<sup>[2]</sup>。本文根据油田配电网自身的特点和谐波基本理论,分析油田配电系统谐波产生的原因及危害,通过目前主要采用的谐波治理方法和滤波技术对比研究,介绍采用有源滤波器实现电力系统谐波动态抑制的发展过程,并对油田配电系统谐波动态抑制技术的发展和进行展望。

## 1 油田配电系统产生谐波的主要原因及危害

在油田配电系统中谐波产生的根本原因是由于钻采系统与油气集输系统采用大量非线性负载所致<sup>[3]</sup>。当电网的正弦波电压施加于非线性负载时,负载的电流波形与所加的电压不呈线性关系,不再和电网电压波形一致,电流因而发生了畸变,形成非正弦电流,非正弦波电流在电网阻抗上产生压降,导致电压波形也成为非正弦波,从而产生谐波,如图1—图4所示。

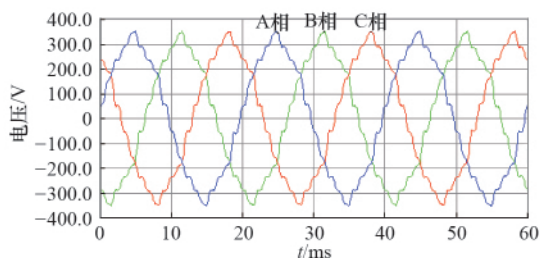


图1 电压波形图

Fig. 1 Voltage waveform

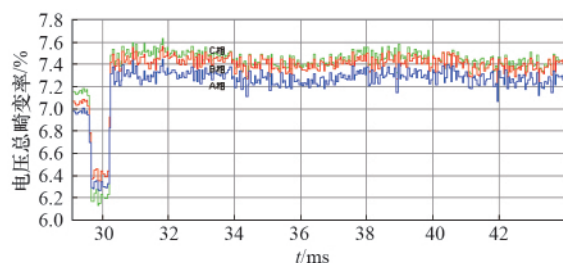


图2 三相电压总畸变率

Fig. 2 Voltage total aberrations rate

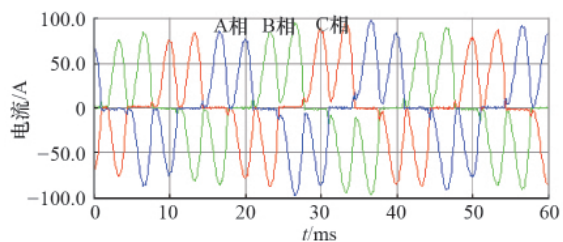


图3 电流波形图

Fig. 3 Current waveform

油田配电系统的主要谐波源可分为两类:含半导体的非线性设备的谐波源,如交直流换流设备、变频器等;含电弧和铁磁非线性设备的谐波源,如日光灯、变压器、电抗器等。

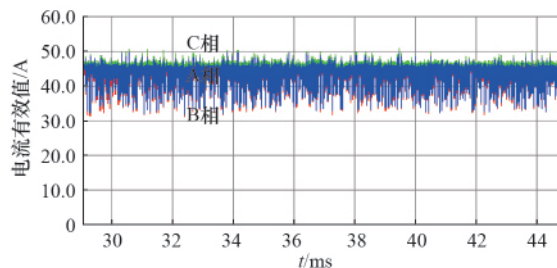


图4 三相电流(有效值)幅值图

Fig. 4 Current (RMS) amplitude

谐波对油田配电网和其他系统的危害主要有以下方面:

(1) 降低发电、输电及用电设备的有效容量和效率,由于涡流和集肤效应,使电机、变压器、输电线路等产生附加功率损耗。

(2) 引起无功补偿电容器谐振和谐波电流放大,损坏无功补偿装置。

(3) 产生脉动转矩致使电动机振动、产生噪声,缩短电机使用寿命。

(4) 谐波电压以正比于其峰值电压的形式增强了绝缘介质的电场强度,加速电容器、电缆等设备的绝缘介质老化,降低设备使用寿命。

(5) 零序谐波电流会导致三相四线系统的中线过载,发热甚至火灾,在三角形接法的变压器绕组内产生环流,严重时甚至引发事故。

(6) 谐波改变了电压或电流的变化率和峰值,延缓电弧熄灭,影响断路器的分断容量。

(7) 影响邻近的电力电子设备、工业控制设备和通讯设备、检测仪表等设备的正常使用。

(8) 影响电力系统中的发电机、调相机、继电保护和自动装置,严重时会造成继电保护装置的误动作,造成重大电气事故。

(9) 可能导致电网谐振,产生过电流、过电压,损坏电网中的电气设备。

## 2 油田配电系统主要采用的谐波抑制技术

### 2.1 油田配电系统谐波污染现状

为确保供电质量,有效防止系统中谐波造成的危害,近年油田有针对性地对集输、注入、配制和注水等用电负荷进行了系统测试,总体来看,反映到6(10)kV系统,谐波含量基本不超过国家标准,但低压侧部分超标是今后治理的重点。

#### 2.1.1 配电变压器低压侧测试结果

油田转油系统变频器负荷占电网总负荷比重小,谐波污染程度较轻,谐波电压含量没有超出国家标准值,但谐波电流含量较高,超出了国家标准值;配注系统变频器负荷占电网总负荷比重大,谐波污染程度严重,谐波电压、电流含量均出现了超出国家标准值的现象;机采井变频器产生谐波干扰

的比率低,产生谐波量少。谐波电流基本以 5 次、7 次谐波为主,且 5 次谐波电流含有率一般占 60%—80%,7 次谐波电流含有率一般占 40%—55%,当变频器输出基波电流较大时,3、11、13、17 次谐波电流含量也会出现超标情况<sup>[4]</sup>。

### 2.1.2 6(10)kV 系统测试结果

油田配电系统 6(10)kV 侧污染程度不大,测试的谐波电压、电流均在国家标准范围之内,只有个别 6(10)kV 出线的 7 次谐波电流接近国家标准限值,应引起注意。

## 2.2 主要采用的谐波抑制技术

在谐波源处采用适当的技术措施吸收谐波电流,可对已有的谐波进行有效抑制,降低谐波对配电系统及内部用电设备的影响。

### 2.2.1 安装电抗器

在低压配电系统中并联电容器组可以提高功率因数,但当谐波存在时,在一定的参数下电容器组会对谐波起放大作用,危及电容器本身和附近电气设备的安全。根据特定波次谐波治理计算结果,对变频器柜及电容器柜做相应的改造,在变频器输入电源侧串联适当的电抗器,将电容器组的某些支路改为滤波器,即可起到降低特定波次谐波含量的作用,还可以限定电容器组的投入容量,避免电容器对谐波的放大。通过技术改造,低压配电系统中高次谐波的含量可达到国家标准控制范围。

### 2.2.2 安装无源电力滤波装置

无源滤波器是由电力电容器、电抗器(常用空心的)和电阻器适当组合而成的滤波装置,运行中它与谐波源并联,安装在电力电子设备的交流侧,对某一特定频率的谐波进行滤除,对某一频率的谐波呈低阻抗,与电网阻抗形成分流的关系,使大部分该频率的谐波流入滤波器,除起滤波作用外,它还能补偿无功功率。通过现场应用,系统治理前超标的 5 次、7 次谐波已能满足国标要求。

然而,无源滤波器的缺陷却也是其本身不可弥补的,这些缺陷包括:无源滤波装置有效材料消耗多、体积大;它不具备快速性、反复性、连续性的特点,不能实现短时纠正电压升高或降落的功能;滤波要求和无功补偿、调压要求有时难以协调;滤波效果不够理想,只能做成对某几次谐波有滤波效果,而很可能对其他次谐波有放大作用,且滤波效果易受元件或系统参数及电网频率等变化的影响;在某些条件下可能和系统发生谐振,引发事故;当谐波源增大时,滤波器负担随之加重,以至可能因谐波过载不能运行等。

### 2.2.3 安装有源电力滤波装置

有源电力滤波器是一种用于动态抑制谐波和补偿无功功率的新型电力电子装置。通过检测被补偿对象的电流瞬时值,经指令电流运算电路得出谐波补偿电流的指令信号,控制变流器产生所需要的补偿电流,它能对大小和频率都变化的谐波成分和无功功率进行补偿,可以克服传统无源滤波器的不足。

如图 5 所示,有源滤波器主要包含谐波检测电路、控制电路和主电路 3 部分。主电路采用 PWM 变流器。

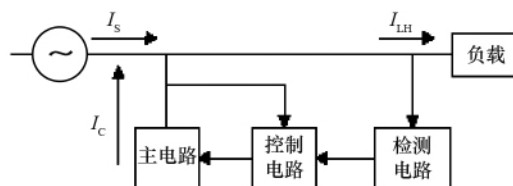


图 5 有源滤波器原理

Fig. 5 Principle diagram of the active filter

有源滤波器工作原理如下:当需要补偿负载产生谐波电流,有源电力滤波器检测出补偿对象负载电流  $I_L$  的谐波分量  $I_{LH}$ ,由控制电路使主电路产生的补偿电流  $I_c$  与  $I_{LH}$  大小相等、相位相反,因而两者相抵消,最终使得电源电流  $I_s$  只含基波,不含谐波。与无源滤波器相比,有源滤波器有以下特点:

(1) 不仅能补偿各次谐波,还可抑制闪变,补偿无功,有一机多能的特点,在性价比上较为合理。

(2) 滤波特性不受系统阻抗等的影响,可消除与系统阻抗发生谐振的危险。

(3) 具有自适应功能,可自动跟踪补偿变化着的谐波,即具有高度可控性和快速响应性等特点。

### 2.2.4 安装有源滤波+无源滤波装置

前面在介绍无源滤波器缺陷的同时也说明了有源滤波器的长处,然而有源滤波器也有不足之处,如工程中实用的并联型 APF,常常因为装置容量大而导致初期投资大、运行效率低。因此,将 APF 和无源滤波装置并联使用,合理分担补偿需求,使 APF 容量降低,同时克服无源滤波器的缺点,是目前为止最为理想的一种谐波抑制措施。

并联型 APF 与无源滤波器融合的方式有并联方式和串联方式两种。图 6 为并联方式示意图,这种方式可能会引起无源滤波器中的 LC 谐振。

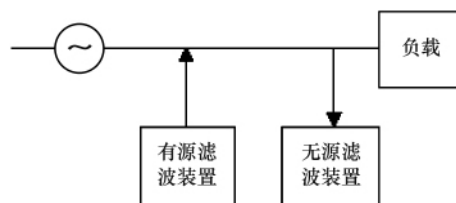


图 6 并联融合方式

Fig. 6 Parallel fusion way

图 7 为串联方式示意图。在这种融合方式中,谐波和无功功率主要由无源滤波器补偿,而有源滤波器的作用是改善无源滤波器的特性,克服无源滤波器易与电网发生谐振的缺点。在这种方式中,有源滤波器不承受交流电源的基波电压,因此装置容量小。

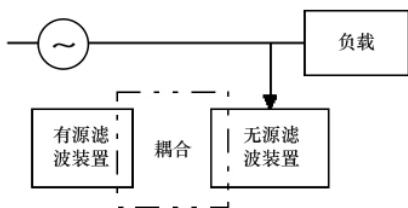


图 7 串联融合方式  
Fig. 7 Series fusion way

### 3 油田配电系统谐波抑制技术展望

随着油田开采技术的不断发展,为满足生产工艺控制、节能等工况需要,电力电子设备在油田各种生产过程中的应用将越来越广泛,油田配电网谐波治理工作将面临更大的困难。为建设绿色油田电网,今后谐波抑制工作应采用预防措施与治理措施相结合的方式,开展以下工作。

(1) 对进入油田电网的变频器等电力电子设备进行质量性能指标评定,严格执行《GB/T 14549—93 电能质量公用电网谐波》国家标准规范要求,实行严格的谐波含量准入制度,对不符合要求的设备严格控制进入油田配网使用。

(2) 在一些油田新建产能工程中设计和使用时非线性负载时,要进行电能质量谐波含量评价,对不能满足国标要求的设备需配套安装谐波治理装置,减小谐波侵入电网。

(3) 对已建设施,进行定期谐波检测,针对性地采用高效的谐波治理措施,同时考虑电网的无功功率补偿问题,实现动态无功补偿和谐波抑制<sup>[9]</sup>,从而减少由于谐波污染带来的巨大经济损失。

采用电力滤波装置消除谐波源产生的谐波电流是抑制谐波“污染”的有效措施,鉴于成本和损耗等问题,目前采用的抑制谐波方法还是以无源滤波静态抑制方法为主,但是随着电力电子技术的迅速发展,基于有源滤波器的动态抑制方法逐渐在取代静态抑制方法<sup>[6-10]</sup>。有源电力滤波器是一种主动式的谐波电流补偿装置,其对电力谐波补偿的效果与对瞬时谐波电流检测的精度有很大的依赖关系。目前采用的谐波电流检测方法都存在难以克服的问题,诸如:对元件的参数和电网的频率变化比较敏感,检测精度不够高,没有自适应能力,不能跟踪谐波含量的变化,用于有源电力滤波器谐波电流的检测效果不理想。神经网络控制是一种新型智能控制手段,其具有自学习能力强、容错性好等特点,神经网络可以根据系统的输入和输出寻找它们之间的非线性关系,理论上可以实现任意非线性组合<sup>[11]</sup>。图 8 所示为谐波动态抑制装置,整个装置由有源滤波和无源滤波两大部分组成,其中有源滤波部分包括:谐波电流的检测单元、调节与控制单元、采用脉宽调制的逆变器 and 直流电源等。将神经网络控制应用到有源滤波控制,为其提供合适的逆变器开关信号,进而发出补偿电流,可以达到理想的效果。采用具有人工神经网络谐波检测及模糊控制晶闸管功能的电力谐波动态抑制方法是未来发展的趋势。

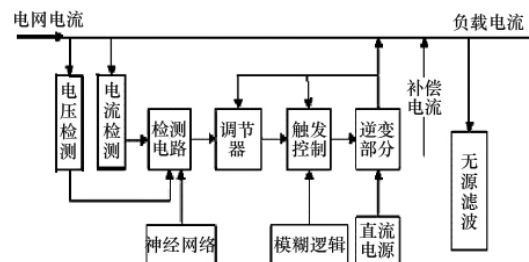


图 8 动态抑制装置原理  
Fig. 8 Principle diagram of the dynamic suppression equipment

### 参考文献 (References)

- [1] 刘晓卓, 李佑勋, 张文生. 谐波治理技术在油田配电网的应用分析[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(10): 63-64.  
Liu Xiaozhuo, Li Youxun, Zhang Wensheng. *Oil-Gasfield Surface Engineering*, 2011, 30(10): 63-64.
- [2] 国家标准化管理委员会. GB/T 14549—93 电能质量公用电网谐波[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 1993.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 14549—93 Quality of electric energy supply—harmonics in public supply network [S]. Beijing: Standardization Administration of the People's Republic of China, 1993.
- [3] 戴庆. 国内外油田配电系统无功与高次谐波补偿理论研究[J]. 国外油田工程, 2002, 18(3): 48-50.  
Dai Qing. *Foreign Oilfield Engineering*, 2002, 18(3): 48-50.
- [4] 李海军. 油田供电系统的谐波污染及其抑制探讨[J]. 化学工程与装备, 2008(11): 52-54.  
Li Haijun. *Chemical Engineering & Equipment*, 2008(11): 52-54.
- [5] 王金全, 杨守城, 郭铁英, 等. 供电系统的无功补偿与谐波抑制 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2001, 2(6): 58-62.  
Wang Jinquan, Yang Shoucheng, Guo Tiejing, et al. *Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2001, 2(6): 58-62.
- [6] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
Wang Zhao'an, Yang Jun, Liu Jinjun. *Harmonic suppression and reactive power compensation*[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [7] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
Wu Jingchang. *Harmonics in the power supply system*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [8] 张厥盛, 张会宁, 邢静. 锁相环频率合成器[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.  
Zhang Juesheng, Zhang Huiming, Xing Jing. *PLL frequency synthesizer* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997.
- [9] 张国忠, 赵家贵. 检测技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997.  
Zhang Guozhong, Zhao Jiagui. *Detection technology* [M]. Beijing: China Jiliang Press, 1997.
- [10] 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 Xiangning, Xu Yonghai. *Electric Power*, 1998, 31(4): 59-61.
- [11] 童梅, 童杰, 蒋静坪. 有源滤波器的神经网络控制 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 57-60.  
Tong Mei, Tong Jie, Jiang Jingping. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2000, 15(1): 57-60.

(责任编辑 马宇红, 朱宇)