

# 电力电子技术

## 与谐波抑制 无功功率补偿技术研究综述

翁利民

(武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

**摘要:** 文章论述了电力电子技术在电力系统中的应用与发展, 分析了无功功率的概念与高次谐波的危害; 以及无功补偿与谐波抑制的现状, 指出电力电子技术与无功补偿、高次谐波抑制是紧密相联的; 对无源滤波技术的优劣进行了分析, 阐述了有源滤波器的机理与实际应用进展, 指出有源滤波器与无源滤波器的结合相关抑制技术可以相互取长补短, 对基于电力电子技术的有源功率因数校正器的工作机理、特点、系统构成作了简单介绍; 分析了解决谐波和无功问题的一些新技术和发展动向, 文章得出了合理的结论。

**关键词:** 电力电子技术; 无功补偿; 谐波抑制; 有源功率因数校正

中图分类号: TM 714.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-0349(2004)03-0006-05

### Review of Researches on Power Electronics and Harmonics Restraining, Var Power Compensation Technique

WENG LI-min

(Wuhan University Electric Engineering Institute, Wuhan, 430072, China)

**Abstract** The application of power electronic promotes neoteric power system, however, it also bring serious harmonic pollution. In this paper the harmfulness of the var power and the high-order harmonic of the power system are discussed. It points out that the status of var compensation is tightly dependent upon the harmonic restraining; the paper analyses the advantages and disadvantages of passive power filter technology and simply introduces the system forming and working principals of active power filter. The applied actualities and development forecasts of power electronic in power system, the fundamental principle and of APFC based power electronics are discussed in this article. The paper also analyses some new technologies and tendency to solve var compensation and harmonic restraining problem, and draws some reasonable conclusion.

**Keywords** Power electronics; Var compensation; Harmonic restraining; Active power factor correction

### 0 引言

电力电子技术是集电力、电子和控制于一体的新综合技术, 这门技术已发展到可以对电能进行高效交换和对电力系统进行调整控制的阶段, 其特点是控制灵活、快速、准确、可靠。

在电力系统中应用电力电子技术可以提高输电能力、改善电能质量、提高电网运行稳定性、可靠性、控制的灵活性并降低损耗。电力电子技术使人们有效地使用现有的电力资源, 以获得更大的经济效益, 这是现代电力系统发展的必然趋势。电

\* 收稿日期: 2004-01-09

1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

力电子连同传动控制技术将与计算机技术一起成为21世纪最重要的两大技术

电力电子技术在推动电力系统发展,灵活高效地利用电能的同时,其设备又成为电力系统中最主要的谐波源,同时消耗无功功率。其谐波污染已成为电力电子技术发展的重大障碍,它迫使我们对谐波问题进行更为有效的研究,以治理谐波污染,维护电力系统的“绿色环境”。

## 1 配电系统的谐波与无功功率

配电系统中的负载大多呈感性,如用于通风、空调、水泵的异步电动机,用于照明的众多荧光灯,以及用于通讯和计算机系统的整流器、电子稳压电源等。其中电动机、荧光灯等负载,以及变压器和电抗器必须消耗无功功率才能正常工作,这是其本身电特性所决定的。而变频器、整流器、电子稳压电源等电力电子装置通常采用相控方式,其交流侧的电流也常常滞后于电压,它们不但要消耗大量的无功功率,还要产生大量的谐波电流,即使简单的二极管整流装置,尽管其交流侧电压电流基本同相,但由于电流波形的畸变,其产生的大量谐波电流也要消耗无功功率。

在电工理论中,对纯正弦交流电路定义了三种功率:有功功率、无功功率和视在功率,三种功率满足下列关系:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

其中,有功功率  $P$  表示瞬时电压与瞬时电流乘积即瞬时功率在一个周波内积分的平均值,其物理意义是交流平均功率,视在功率  $S$  表示电气设备的最大可利用容量,它是电压电流有效值的乘积,工程上作为电气设备功率设计的极限值,其中额定电流由导线截面积和铜耗决定,额定电压由绝缘性能决定,而无功功率表示含储能元件的电路或系统的一种功率互换的幅度,单相电路中的功率互换直接发生在电源与储能设备(电感、电容)之间,三相电路则表现在通过具有储能特性的负载在三相之间来回流动,任一瞬时三相无功之和恒等于零。

对于非正弦交流电路来说,电流和电压可进行傅氏分解并表示成级数形式,视在功率仍然可表示为:

$$S = UI = \overline{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \overline{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

其中  $U_n$ 、 $I_n$  分别为基波和各次谐波电压、电流有效值

作一般分析时,考虑到电网电压波形的畸变小,而电流波形畸变大,因而忽略电压波形的畸变而只考虑电流波形畸变的影响,这对公用电网无功功率分析具有很大的实用意义,此时视在功率可表示如下:

$$S^2 = U^2 I^2 = P^2 + Q^2 + \overline{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 I_n^2} = P^2 + Q^2 + D^2$$

$$\text{其中 } D = \overline{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2 I_n^2}$$

这里将无功功率分解为两项,其中  $Q$  表示基波电流产生的无功功率,  $D$  表示谐波电流产生的无功功率,则功率因数可表示为:

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U I_1 \cosh \varphi}{U I} = \frac{I_1}{I} \cosh \varphi = \lambda_1$$

上式中:  $\varphi = \frac{I_1}{I}$ , 称为基波因数或波形畸变因数,  $\lambda_1$  为基波功率因数或称为位移因数

可见,非正弦电流电路的功率因数不仅取决于基波电流相移,而且与电流波形畸变即谐波大小密切相关,它等于基波位移因数与波形畸变因数之乘积。因此电流畸变或电路中含有谐波时将导致无功功率增大,功率因数降低,从而使设备电气容量的可利用率下降,这对所在配电网络是极不利的。

## 2 无功功率的影响和谐波的危害

### 2.1 无功功率的影响

(1) 无功功率增加,导致电流增大和供电设备视在功率增大,而且将导致起动及控制设备、测量仪表的尺寸和规格增大。

(2) 设备及线路损耗增加 无功功率的增加,使总电流增大,从而使设备及线路损耗增加

(3) 变压器及线路压降增大,使电网电压剧烈波动

(4) 电压波动主要是由无功波动引起的,如果是冲击性无功负载,将导致电压的剧烈波动

### 2.2 谐波的危害

(1) 谐波使设备产生附加谐波损耗,降低供配电设备及用电设备的效率

(2) 谐波会影响各种电气设备的正常工作,谐

波引起过电压、过电流使变压器严重过热;使电容器、电缆过热,绝缘老化,寿命缩短

(3)谐波会引起公用电网局部谐波放大,甚至并联谐振和串联谐振,对这一现象,因为易引起设备损坏和安全事故,应特别关注。

(4)谐波导致继电保护和自动装置的误动作与拒动作。

另外,对于三相四线制系统还有大量3n次谐波流过中线,使线路过热,易烧毁元器件;谐波将影响电气设备的正常工作,如引起电气设备机械振动、噪声,缩短使用寿命甚至损坏;使常规测量仪表的精度大大降低;谐波还对邻近通讯系统、自动化系统以及包含微电子或计算机设备的系统造成严重干扰,轻者产生噪声,降低运行质量,重者导致信息丢失,无法正常工作。可见,高次谐波的不利影响是诸多方面的,必须采取有效措施加以抑制。

### 3 电力电子技术在电力系统中的应用现状

电力系统中的半导体装置很多,大到直流输电用的换流器,小到家用电器中的开关电源、电池充电器,还包括工业中广泛应用的变频器、整流器、调压器等,其应用遍布于电力系统各个电压等级。

高压直流输电(HVDC)技术,对大容量远距离输电来说更经济并具有一些交流电所没有的优越性。目前,全世界HVDC工程已达50多个,总设备容量超过36000MW,新一代HVDC技术中正在考虑使用GTO、IGBT等可关断器件,以及脉宽调制(PWM)等技术。鉴于我国地域辽阔,能源分布及负荷发展极不平衡,发展HVDC显得非常重要。

静止无功补偿器(SVC),用以晶闸管为基本元件的固态开关替代了机械开关,以控制电抗器和电容器的方式实现了快速、频繁地改变输电系统的导纳功能。SVC由可控支路和固定(或可变)电容器支路并联而成,主要有四种型式:可控硅控制空芯电抗器型(SCR型)、可控硅阀控制高阻抗变压器型(TCT型)、可控硅开关控制电容器型(TSC型)、自饱和电抗器型(SSR型)。其中TCR型具有反应快(5~20ms)、运行可靠、无级补偿、分相调节、能平衡有功、使用范围广、价格便宜等优点。因此工业发达国家的主要电气设备制造公司都生产和积极推广这种装置,应用最广,是发展的主流。全世界已有超过220套,总容量为

35000MVar的SVC在输配电系统运行,超过380套,总容量为18000MVar的SVC在工业部门应用。预计SVC在输电和配电领域以及工业用户方面都将有更大发展。

FACTS已经成为电力系统新技术应用的关键,国内清华大学研制20MVar的STATCOM装置已经在电力系统投入实际运行,电科院合作研究在伊敏电厂500kV出线上安装TCSC,TCSC仅比常规的串补增加了晶闸管阀和电抗器等设备,价格上比常规串补高20%~30%,而在性能上却有了较大提高,特别是能解决串补线路的次同步振荡问题,因而TCSC是非常值得推广的FACTS技术。另外晶闸管控制的制动电阻(TCBR)、晶闸管控制的移相器(TCPS)、相间功率控制(IPC)、超导储能器(SMES)等的研究也正在取得积极进展。

用户电力技术(CP)也是快速发展的新技术。采用FACTS的核心是加强交流输电系统的可控和增大其电力传输能力,而发展CP的目的是在配电系统中加强供电的可靠性和提高供电质量。CP和FACTS的共同基础技术是电力电子技术,各自的控制器在结构和功能上也相同,其差别仅是额定容量不同,二者的融合是一种趋势。具有代表性的用户电力技术产品有:动态电压恢复器(DVR)、固态断路器(SSCB)、故障电流限制器(FCL或DCLD)、电能质量调节器(PQC)等。随着用户对电能质量要求的不断提高,用户电力技术具有良好的发展前景。

对于变频调速(SFC)技术,已进入对直流调速取而代之的趋势。它在电力系统的应用主要有两个方面:一是将工业企业的风机、水泵改为变频调速控制,具有很大的节电效益;二是发电厂与抽水蓄能机组采用SFC技术,可减小机组启动过程对电网的冲击,并且机组在低水头运行时,还可提高机组的出力和效益。

### 4 无功补偿与谐波抑制的现状

#### 4.1 无功功率补偿的现状

在电力系统中,补偿无功功率的方法很多,包括采用同步发电机、同步电动机、同步调相机、并联电容器和SVC等。在许多工程的供电系统中,由于阻感型负载居多,总等效负载呈感性,通常采用并联电容器补偿无功功率,提高功率因数。当启

用自备发电机组供电时,都配有自动励磁调压装置对无功和电压进行自动调节。

根据安装位置不同,并联电容器补偿有三种方式:一是将电容器组集中安装在母线上,以提高整个变电所的功率因数,减少馈出线路的无功损耗;二是分区补偿,将电容器组分别装设在功率因数较低的区域母线上,补偿效果更好,缺点是补偿范围比集中补偿时小;三是就地补偿,针对感性设备如异步电动机,以荧光灯为主的照明线路等,将电容器组安装在负载设备附近,就地进行无功补偿,这种方式优点是既能提高用电设备供电回路的功率因数,又能改善用电设备的电压质量,缺点是电容器安装分散,维护工作量大,随着国产低压自愈式电容器技术与生产水平的提高,为就地补偿方式的推广创造了条件。

#### 4.2 谐波抑制的现状

消除供电系统谐波的方法主要有两种:一种是采用无源 LC 滤波器或有源电力滤波器滤波;第二种是改造谐波源,如提高变流器的相数,采用高功率因数整流器等。

目前工程上应用最多的还是无源 LC 滤波器,它结构简单,投资少,可靠性高,运行费用也比较低。它滤除谐波的原理实质上是为电路中的谐波提供一条低阻抗路径,即保留基波而使谐波短路,使谐波可通过滤波器而不注入系统。

无源滤波器 (Passive Power Filter, 简称 PPF),通常是采用电力电容器、电抗器和电阻按功能要求组合而成,最简单的是单调谐的 LC 滤波器。单调谐滤波器主要是用来抑制某一特征次谐波,滤波器支路在该次谐波频率下串联谐振,形成低阻抗通路,使该次谐波电流不再或尽可能小地流入电网,达到抑制谐波的目的。要滤除若干个特征次谐波,就用若干个单调谐滤波器并联接到电网。无源滤波器还可以设计成双调谐的,它同时可以滤除两种频率的谐波;也可以作成多阶的,但电路复杂,应用较少。另外,PPF 还可以设计成高通滤波器,以滤除某一次以上的谐波。无源滤波器由于其结构简单,成本低,在吸收谐波的基础上还可以补偿无功,改善功率因数;同时无源滤波器又具有维护方便,以及有较成熟的技术、设计和制造经验,因此无源滤波方案是目前采用得最为广泛的谐波抑制和补偿无功的主要手段。

PPF 的滤波原理是提供一并联低阻抗通路,

因此其滤波特性是由系统和滤波器的阻抗比所决定,这样 PPF 就存在以下缺点: (1) 滤波特性受系统参数与运行工况影响比较大,设计起来较困难,谐振频率依赖于元件参数,因此只能对主要谐波进行滤波,LC 参数的漂移将导致滤波特性改变,使滤波性能不稳定; (2) 电网的参数与 LC 可能产生并联谐振使该次谐波分量放大,使电网供电质量下降; (3) 滤波要求和无功补偿、调压要求有时难以协调。

有源电力滤波器 (Active Power Filter, 简称 APF),即利用可控的功率半导体器件向电网注入与谐波源电流幅值相等、相位相反的电流,使电源的总谐波电流为零,达到实时补偿谐波电流的目的。它与无源滤波器相比,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。

具体地讲,APF 实现高次谐波抑制的思路是给谐波电流或谐波电压提供一个在谐振频率处等效导纳为无穷大的并联网络或等效阻抗无穷大的串联网络,因此可以分为并联有源滤波器和串联有源滤波器,其基本结构是一个 DC/AC 逆变桥与一个谐波注入电路。APF 的研究在国内已经进入实验阶段,相信随着电力电子技术的进步和其元件的性价比的提高,APF 的实际应用将更加广泛。

#### 5 有源功率因数校正技术

大量电力电子装置,特别是开关电源的使用,促进了功率因数校正 (Power Factor Correction, 简称 PFC) 技术的发展,开始从无源功率因数校正 (Passive Power Factor Correction, PPFC) 技术,转变为以有源功率因数校正 (Active Power Factor Correction, APFC) 技术为重点。与补偿无功功率和谐波的方法相比,这种方法属于既不产生谐波,且功率因数为 1 的新型变流器。

APFC 技术基本原理:

忽略电网电压畸变,则网侧电压可表示为:

$$u(t) = \sqrt{2} U_1 \sin(k_0 t + h) \quad (1)$$

式 (1) 中:  $U_1$  为基波电压有效值,  $k_0$  为基波电压频率,  $h$  为基波电压初相位。

网侧电压有畸变时,网侧电流可表示为:

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(k_0 t + \gamma_1) + \sum_{n=2}^{\infty} E_n \sin(n t) \quad (2)$$

式(2)中:  $I_1$  为基波电流有效值,  $k_0$  为基波电流角频率,  $\gamma_1$  为基波电流初相位。

由式(1)和式(2),得有功功率为:

$$P = U_1 I_1 \cos(\gamma_1) \quad (3)$$

式(3)中  $\gamma_1 = \varphi_1 - \beta_1$  为基波电压和基波电流的相位差

又视在功率为:  $S = UI$  (4)

由以上各式得功率因数为:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\cos \gamma_1}{1 + \frac{THD}{I_1^2}} \quad (5)$$

式(5)中  $\xi = \frac{I_1}{I}$  称为畸变因数,  $\cos(\gamma_1)$  称为相移因数, 总谐波电流含量定义为:

$$THD = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}} \quad (6)$$

由式(5)可见,若能使 AC/DC 变换器中不产生谐波电流,并使基波电压和基波电流间不产生相移,则实现了单位功率因数 1。

APFC 技术最突出的特点在于它使电力电子装置不产生谐波电流和无功,因此无需进行谐波补偿和无功补偿。

大容器变流器提高功率因数和减少谐波的主要方法是采用多重化技术。如果要求总功率因数为 1,甚至提供超前的无功功率,则一般须使用自换相变流器。中等容量的单位功率因数变流器主要采用 PWM 整流技术,一般需要使用自关断器件。以前对 PWM 逆变器研究较多,而对 PWM 整流器研究较少。对电流型整流器,可直接对各个电力半导体器件的通断进行 PWM 调制,使输入电流为接近正弦且与电源电压同相的 PWM 波形,从而得到接近 1 的功率因数。对电压型整流器,需将整流器通过电抗器与电源相连。

为实现单位功率因数,小容量整流器多采用二极管整流加 PWM 斩波方式。这一方式在各种开关电源中有着非常广阔的应用前景,必将对谐波污染的治理作出巨大的贡献。

使电力电子装置本身不产生谐波和无功是一种积极的节能降耗的措施,能获得巨大的经济效益。

因而对单位功率因数变流器的研究近年来已成为电力电子领域的一大热点。

## 6 结语

从以上的分析可知,无功电流补偿实现手段正趋于与电力电子技术的结合。结合方式有三种,一是为投切电容器的开关,二是作为无功输出的调节开关,三是引入电力电子变流技术,将变流器作为无功电源,以补偿无功。目前在我国广泛使用的以 SVC 为代表的传统的无功补偿装置,国内外对 SVC 的研究集中在控制策略上,模糊控制、人工神经网络和专家系统等智能控制手段也被引入 SVC 控制系统,使 SVC 系统的性能更加提高。但是由于无功补偿新技术与新装置,即 STATCOM 装置等的突出优点,使得无功补偿技术未来发展的方向主要以电力电子及其逆变技术为核心,开发出性能更为优越的装置。

无功补偿和谐波抑制始终有着密切的关系,两者的技术发展与进步是相互协调的,有源滤波器可以克服无源滤波器在实际运行中补偿特性易受电网阻抗变化和运行状态影响,与系统发生谐波放大甚至并联谐振的缺陷,若将无源滤波器和有源滤波器相结合构成混合滤波器,相互取长补短,兼有两种滤波器优点,这种方案是谐波抑制方案研究的热点;更为积极的方法是单位功率因数变流器,它是不产生谐波且功率因数为 1 的新型变流器,它将有力地推动无功补偿和谐波抑制新技术的进步,前景十分广阔。

## 参考文献:

- [1] 王金全,杨宋城等.供电系统的无功补偿与谐波抑制[J].解放军理工大学学报,2001,(6): 58-62;
- [2] 陈丽敏,史立生.电力电子装置谐波抑制、无功补偿及有源功率因数校正技术综述[J].电气传动自动化,1998,(3): 3-6;

## 作者简介:

翁利民(1969-),高级工程师,博士研究生,从事电力系统电压稳定与电能质量的研究。

E-mail: lmweng@sina.com 或 09019@wisdri.com;

联系电话: (027) 86863356-8474