

交流调谐滤波器的进展

同向前¹, 陈延敏², 贾荣², 孙伟³, 薛钧义¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西电电子计算技术应用研究所, 陕西 西安 710077;
3. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Development of Tuned AC Filter

TONG Xiang-qian¹, CHEN Yan-min², JIA Rong², SUN Wei³, XUE Jun-yi¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. XD Electronic Computer Technique Application Research Institute, Xi'an 710077, China;
3. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China)

摘要: 论述了交流调谐滤波器的工作原理和固有缺点, 说明滤波器参数变化所引起的失谐是导致滤波性能恶化的主要原因。介绍了新型自动连续调谐滤波器的原理结构及其关键部件, 指出用有源技术增强 LC 调谐滤波器对参数变化的自适应能力是滤波装置今后的一个发展方向。

关键词: 调谐滤波器; 可调电抗器; 谐波

中图分类号: TM761

文献标识码: A

Abstract: The principle and the inherent demerits of tuned AC filter are discussed, the detuning due to variation of filter parameters is the main cause of deterioration of filtering performance. The newly developed auto-tuned filters are introduced in this paper. It is the tendency to have the tuned AC filter gain the adaptability to network frequency excursions and filter component variations using active techniques.

Key words: tuned filter; tunable reactor; harmonics

1 前言

随着电力电子技术的发展, 越来越多的以电力电子装置为基础的用电设备和输配电设备投入电网运行, 如整流电源、交流变频传动、高压直流输电(HVDC)和柔性交流输电系统(FACTS)等。由于电力电子装置属典型的非线性设备, 它的挂网运行将在电力系统中产生严重的谐波污染, 不仅在输配电和用电系统中引起额外的电能损耗, 降低输配电设备的运行效率, 还影响电力系统的安全运行, 产生电磁干扰^[1]。

交流调谐滤波器^[2,3]是一种有效的并且得到广泛应用的谐波抑制装置, 它具有结构简单、安全可靠、经济实用等特点。尽管近年来滤波性能更加优良的有源电力滤波器(APF)得到快速发展和应用, 但

在高压大容量系统, 交流 LC 调谐滤波器还处于无可替代的地位。然而, LC 调谐滤波器具有许多固有缺点和限制^[4], 如存在与系统电抗发生谐振的可能、滤波效果对电网和滤波器元件参数的变化比较敏感等。因此, 研究新型调谐滤波器的结构、改善调谐滤波器的滤波性能、提高调谐滤波器的适用范围和参数变化自适应能力, 一直是谐波抑制用调谐滤波器的研究方向。

2 交流调谐滤波器的原理和固有缺点

从电路结构上讲, 并联型交流单调谐滤波器是一个电阻 R 、电感 L 和电容 C 的串联支路, 见图 1。滤波器阻抗 Z_f 随信号频率 ω 的变化规律为:

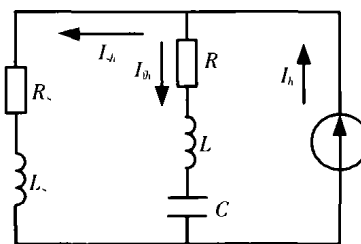


图1 滤波性能分析等值电路

$$Z_f = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})$$

设滤波器调谐于 h 次谐波频率, 理论上讲, LC 的值应满足:

$$X_{fh} = h\omega_1 L - \frac{1}{h\omega_1 C} = 0$$

从而使得滤波器在 h 次谐波频率下的阻抗最小, 式中 ω_1 为电网基波频率。但是, 电网基波频率实际值会偏离其额定值, LC 的实际值也会因制造误差和环境影响而偏离设计标称值, 从而使滤波器在 h 次谐

波频率下的阻抗^[1]为:

$$Z_{fh} = R + jX_{fh} = R(1 + j2\delta q) \quad (1)$$

式中: δ 为等值频率偏差或称失谐度,定义为电网 h 次谐波频率偏离滤波器谐振频率的程度; $\delta = \frac{\omega_h - \omega_r}{\omega_r}$;

q 为滤波器的品质因数; $q = h\omega_r L/R = \sqrt{L/C}/R$ 。

等值频率偏差是由电网频率偏差和 LC 滤波元件偏差造成的,它们之间有如下关系^[1]:

$$\delta = \frac{\Delta\omega_1}{\omega_1} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) = \delta_\omega + \frac{1}{2} (\delta_L + \delta_C)$$

并联调谐滤波器的滤波效果常用谐波分流比 k_h 来表征,定义如下:

$$k_h = \frac{I_{sh}}{I_h} = \left| \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} \right|$$

式中: I_h 和 I_{sh} 分别为谐波源负荷发生的 h 次谐波电流和注入电网的 h 次谐波电流, Z_{fh} 和 Z_{sh} 分别为滤波器和电网在 h 次谐波频率下的阻抗。可见,滤波器的 h 次谐波阻抗越小,滤波效果越好。

电网频率及 LC 元件偏差的存在,导致滤波器存在一定程度的失谐。式(1)表明,失谐增大了滤波器的 h 次谐波阻抗,降低了滤波器的滤波效果。实际上,失谐的存在和不确定性降低了滤波器的滤波性能,也加大了滤波器的设计难度。

尽管无源调谐滤波器结构简单,但却存在众多固有缺点:

(1)考虑到失谐对滤波性能的影响,设计中滤波器品质因数选取较低,导致滤波器的滤波效果较差,功耗较大。

(2)滤波器的滤波效果严重依赖电网阻抗的大小,当电网容量增大而阻抗减小时,滤波性能显著恶化。对于强电网(电源阻抗较小)而言,要取得良好的滤波效果,要求滤波器具有较大的容量,不仅可能造成无功功率过补偿,还会增大调压难度(投入时可能过压,切除时可能欠压)。

(3)一旦滤波器设计安装,其调谐频率和容量都不易改变,基本不具备可移植性。

(4)若负荷谐波发生量高于设计值或电网存在背景谐波,滤波器容易发生谐波过流。一旦发生过流,只有切除滤波器。为避免滤波器过流,在设计中往往使滤波器正常工作于偏调谐状态^[5],滤波性能进一步降低。

(5)调谐滤波器在其调谐频率以下呈现容性,因而会与电网电抗在其调谐频率以下的某个频率发生并联谐振,放大某些低次谐波,影响滤波效果。当装设多个滤波支路时,设计和调整都比较困难。

(6) LC 调谐滤波器在基波时呈现出容性,向电网输送一定的无功功率,这在许多情况下正好符合感性电荷对无功的需求。电容选取大一些,有助于提高滤波效果和适应较大的失谐。但是,在某些应用场

合(如采用电容换相的HVDC装置),仅需要少量的无功补偿量,此时,无功补偿与滤波可能发生矛盾,必要时需设置电抗器来吸收滤波器发出的多余容性无功功率。

(7)失谐对滤波器的参数选择和滤波性能都有显著影响。为减小失谐,常要求滤波元件具有较小的制造误差、较小的环境温度系数和较小的调整误差,导致成本提高。

交流调谐滤波器之所以存在上述缺点,主要归因于 LC 调谐滤波器缺乏在线调控功能,对电网参数和滤波器自身元件参数的变化不具备跟踪调节能力,其补偿特性不能自动适应自身参数和环境参数的变化。

3 自调谐滤波器

鉴于固定参数 LC 调谐滤波器的上述缺点,国内外很早就开展了自调谐滤波器的研究,而且随着新技术的发展而不断改进。自调谐功能的实现方法^[6,7]主要有:

(1)由于在滤波器元件中,电容器的电容量对环境温度较为敏感,构成等效频率偏差的一个主要因素,因而若能维持电容器恒温,则可减小电容量的变化幅度。采用自动恒温控制的电容器是方法之一。

(2)利用机械开关自动投切位于地电位的电容器单元,根据需要自动改变滤波电容量。

(3)利用机械开关自动调整电抗器的分接头,根据需要自动改变滤波电感值。

(4)利用晶闸管静止开关自动调整电抗器的分接头,根据需要自动改变滤波电感值。

自调谐滤波器的特点是滤波器参数的调节是有级的,不能调整到最佳状态。增加自调谐装置后,增大了滤波装置的造价,在HVDC系统中还降低了换流站的可靠性^[3]。

4 自动连续调谐滤波器

自动连续调谐滤波器是一种基于评估技术的滤波解决方案,以期解决由电源频率偏差和滤波器元件参数变化引起的滤波器失谐而导致的滤波性能的恶化。如图2所示,自动连续调谐滤波器由 LC 滤波主电路和自动调谐控制单元组成,测控单元实时检

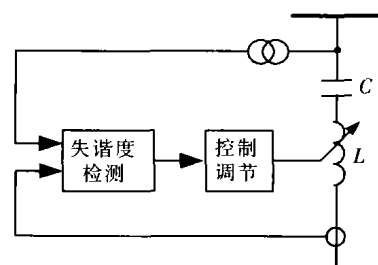


图2 自动连续调谐滤波器的原理结构

测滤波器的失谐程度,根据失谐度自动连续调节电感量,以适应滤波参数的变化,使滤波器始终处于最佳调谐状态。

自动连续调谐滤波器的关键在于开发一种电抗器,其电感参数能够根据需要通过电子控制方式实现自动连续调节,并具有一定的调节范围。利用铁心电抗器的正交磁化特性,可以实现电感量的电子式控制^[8],并构成一种自动连续调谐滤波器。

ABB公司在1993年试运行一种基于正交磁化电抗器的新型交流滤波器——交流连续调谐滤波器^[9],并试用于瑞典某

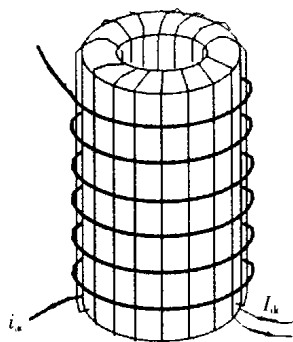


图3 连续可调电抗器

300 MW 高压直流输电系统中。交流连续调谐滤波器的核心部件是一种基于铁心正交磁化原理的连续可调电抗器,见图3。可调电抗器采用一种具有一定高度的管状铁心,沿管的内外绕有直流控制绕组,沿管状铁心的外围绕有与

直流绕组正交的交流主绕组。通过控制直流绕组中直流电流的大小,可以在一定范围内连续调节交流绕组的电感量。

交流连续调谐滤波器具有一系列优点。首先,它具有良好的失谐自动补偿性能,使其品质因数可以高达200,而一般调谐滤波器的品质因数通常在30~60,因而具有更好的滤波性能和更小的运行功耗;其次,由于采用铁心结构,体积小,减小了滤波器的占地面积;此外,采用了电子控制方式,响应速度快,可靠性高。

5 有源调谐滤波器

利用计算机测控技术,控制电压源逆变器的端口电压和电流关系,使其呈现出感性或容性,从而可以构成一个参数可以连续调节的虚拟电抗器或电容器。虚拟电抗器的概念主要由日本学者 H.Funato 等人在1992年提出^[10],并在其后相继进行了理论和试验研究^[11,12]。H.Funato 将这种虚拟电抗器称为 VAPAR,而文[13,14]则称为可变电感或有源电感。如图4所示,测控单元实时检测电压源逆变器的端口电流(或电压),按照虚拟电感 L_v 的关系控制电压源逆变器产生相应的端口电压(或电流)。

将虚拟电抗器的概念引入到交流调谐滤波器中,用虚拟电抗器实现滤波电抗器的连续调节,形成无源与有源的混合型滤波电路拓扑结构—— LC 与虚拟电抗器的串联调谐电路^[14,15]。如图5所示,通过检测滤波器的失谐程度并控制虚拟电抗的正负和

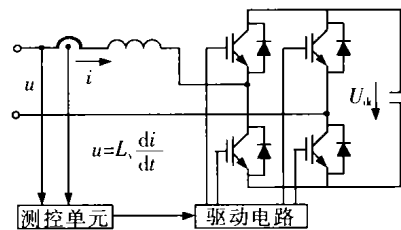


图4 虚拟电抗器原理

大小,从而自动调节滤波器的谐振频率,达到自动跟踪补偿电网频率和 LC 参数变化的目的。

有源调谐滤波器综合了 LC 调谐滤波器和有源滤波器的优点,既提高了滤波效果,克服了 LC 调谐滤波器的种种缺点,而且有源部分容量小,性价比高。采用图5结构,有源部分的容量还不足并联型有

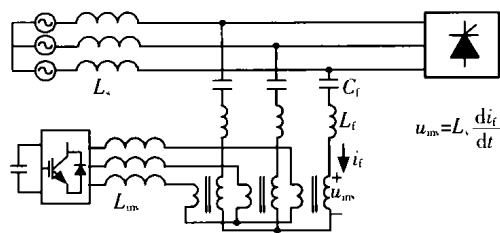


图5 应用虚拟电抗器的有源调谐滤波器

源滤波器容量的5%。文[14,15]对有源调谐滤波器做了比较深入的仿真研究,但目前未见试验研究和具体应用方面的报道。

由于有源调谐滤波器与一般的混合滤波器具有基本相同的电路拓扑,只是控制策略不同而已,因此也可称为混合滤波器或有源滤波器。

文[16]提出另一种磁通可控的可变电抗器结构。通过在带气隙变压器的二次侧采取有源的方式注入一个与一次侧电流频率相同、相位相反的电流,改变二次侧电流的大小便可实现变压器一次侧电抗的连续可调。如果从变压器一次侧电流中提取出某次谐波电流并注入到二次侧,则可调节变压器一次侧的谐波电抗,从而构成一种新型有源调谐滤波器。

6 结语

随着电力供需矛盾的缓解和电力市场的形成,电能质量已成为供用电双方共同关注的问题。谐波是电能质量的一个主要方面,作为谐波抑制装置,滤波器必将得到广泛应用。常规 LC 调谐滤波器和新型有源滤波器各有其优缺点和应用范围,但将有源技术和 LC 调谐滤波器相结合而形成的自动连续调谐滤波器或有源调谐滤波器将会成为谐波抑制装置的一个重要发展方向。

参考文献:

- [1] 张直平. 城市电网谐波手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 孙树勤, 林海雪. 干扰性负荷供电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.

行,都已积累了一定的经验,特别是基于采样线圈配光纤型的ECT已经具备了产品化的条件。

(4)国内外不少企业斥资投入ECT制造领域,也推动了ECT的市场化应用进程。

6 采样线圈配光纤型ECT产品化需解决的几个问题

(1)参照传统的电流互感器首先设计出ECT的整体设计方案。

(2)采样线圈的结构、工艺参数的设计定型。

(3)光纤信号传输系统的工艺及参数的选定。

(4)光电转换与电光转换,能量供应,D/A,A/D,与综保装置接口等电子电路设计。

(5)ECT的参数校验与标定方法。

根据电子式电流互感器工作原理的分类,结合当前材料、工艺状况及电网设备水平,笔者认为:采样线圈配光纤型电子式电流互感器在充分解决以上问题的基础上具有广泛的产品化前景。

参考文献:

- [1] IEC 60044-8. 电子式电流互感器[S].
 - [2] U Holm, H Sohlstrom, T Brogardh. Measurement System for Magneto-optic Sensor Materials[J]. J Phys. E: Sci. Instruments, 1984, 17: 885-889.
 - [3] Ning Y N, Wang Z P, A W Palmer, et al. Recent Progress in Optical Current Sensing Techniques[J]. Review of Science Instruments, 1995, 66(5): 3 097-3 111.
 - [4] 靳伟, 廖延彪, 张志鹏. 导波光传感器: 原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
 - [5] 平绍勋, 黄仁山. 光电式电流互感器的现状和发展[J]. 高压电器, 2001, 37(3): 43-46.
 - [6] 朱勇, 叶妙元. 220 kV 组合式光学电压电流互感器的设计[J]. 高电压技术, 2000, 26(2): 34-36.
 - [7] A A Jaecklin, M Lietz. Elimination of Disturbing Birefringence Effects on Faraday Rotation[J]. Applied Optics, 1972, 11(3): 617-621.
 - [8] H Katsukadwa, H Ishikawa, H Okajima, et al. Development of an Optical Current Transducer with a Bulk Type Faraday Sensor for Metering[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(2): 702-707.
 - [9] A Ulmer, A Jr. High-accuracy Optical Current Transducer for Delivery, Electric Power Systems[J]. IEEE Trans. on Power 1990, 5(2): 892-898.
 - [10] 易本顺, 刘延冰, 阮芳. 光学电流互感器现场运行性能分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 138-140.
 - [11] Ma X Y, Lou C M. A Method to Eliminate Birefringence of a Magneto-optic AC Current Transducer with Glass Ring Sensor Head[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1 025-1 029.
 - [12] M Willsch, S Mohr, T Bosselmann. Extension of the Measuring Range of Magneto Optic Current Sensors Using Two Wavelengths Evaluation[A]. 13th International Conference on Optical Fiber Sensors[C], Kyongju, Kore, 1999.
 - [13] B Yi, A Cruden, J R Medonald, et al. A Novel Bulk-glass Optical Current Transducer Having an Adjustable Multi-Ring Optical Path[A]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference[C], Ottawa, Canada, 1997.
 - [14] 乔峨, 安作平, 罗承沐, 等. 光电式电流互感器的开发与应用——21世纪互感器技术展望[J]. 变压器, 2000, 37(1): 40-43.
-
- 作者简介: 孙振权(1966-), 男, 在职项士, 研究方向为现代高压测量。
-
- (上接第 375 页)
- [3] 夏道止, 沈赞坝. 高压直流输电系统的谐波分析与滤波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
 - [4] D Rivas, I. Moran, J Dixon. Improving Passive Filter Compensation Performance with Active Techniques [A]. Proceedings of 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power[C], Orlando, Florida, USA, 2000.
 - [5] Lin Kun-ping, Lin Ming-hoon, Lin Tung-ping. An Advanced Computer Code for Single-tuned Harmonic Filter Design[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1998, 34(4): 640-648.
 - [6] 浙江大学直流输电电科研组. 直流输电[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
 - [7] Nalson David. A Self-tuning Filter for the Mitigation of Power System Harmonics[D]. University of Alberta, Canada, 2000.
 - [8] Joshua Phinney, Kavid J Perreault. Filters with Active Tuning for Power Applications[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(2): 636-647.
 - [9] Lennart Carlsson, Gunnar Flisberg. Recent Classic HVDC Development[EB/OL]. http://www.abb.com/, 2002-03-18.
 - [10] H Funato, A Kawamura. Proposal of Variable Active-passive Reactance [A]. Proceedings of IECON'92 [C], San Diego, USA, 1992.
 - [11] H Funato, A Kawamura. Control of Variable Active-passive Reactance and Negative Inductance[A]. Proceedings of PESC'94[C], Taipei, China, 1994.
 - [12] H Funato, A Kawamura. Realization of Negative Inductance Using Variable Active-passive Reactance [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1997, 12(4): 589-596.
 - [13] D Hamill, M T Bina. The Bootstrap Variable Inductance and its Application in AC Power Systems [A]. Proceedings of APEC'99[C], Dallas, Texas, USA, 1999.
 - [14] S Bhattacharya, Cheng Po-tai, D M Divan. Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications [J]. IEEE Trans on Industry Application, 1997, 33(3): 732-747.
 - [15] A M Gole, M Meisingset. An AC Active Filter for Use at Capacitor Commutated HVDC Converters [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 335-341.
 - [16] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.
-
- 作者简介: 同向前(1961-), 男, 博士生, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用及电能质量。