

高压直流输电系统多调谐滤波器 参数摄动的影响分析

童 泽, 罗隆福, 李 勇

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

Effect Analysis on Parameter Perturbation of Multi-Tuned Filters in HVDC System

TONG Ze, LUO Long-fu, LI Yong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: In general the circuit topology of multi-tuned filter consists of one series branch and multi-parallel branches. When multi-tuned filter is put into operation, due to the influences of random variation of both ambient environment and system operating conditions, there will be parameter perturbation in series and parallel branches, thus its due harmonic suppression effect is weakened. In this paper the common structural forms of several kinds of multi-tuned filters, which are used in HVDC power transmission projects, are presented, their impedance frequency characteristics as well as existing loss characteristics in operation are analyzed. On this basis, when series and parallel branches are impacted by parameter perturbation in different extent, the characterized detuning extent of multi-tuned filter and the influence extent of parameter perturbation on filtering effect are expounded, and its evolution law is summarized. These analysis results possess a certain practical engineering value and are available for reference in effective and stable operation of multi-tuned filters in hybrid AC/DC transmission system and the setting of filtering parameters.

KEY WORDS: HVDC power transmission; multi-tuned filter; parameter perturbation

摘要: 多调谐滤波器在电路拓扑结构上通常由一个串联支路和多个并联支路组成。在实际工程应用时,受周围环境及系统运行工况随机变化的影响,串并联支路一般会存在一定程度上的参数摄动,从而削弱了其应有的谐波抑制效果。文章介绍了几类目前 HVDC 工程应用中常见的多调谐滤波器结构型式,分析了其阻抗频率特性及其所存在的运行损耗特性。在此基础上,详细阐述了串联支路与并联支路受不同程度参数摄动的影响时,其表征出来的多调谐滤波器失谐程度及其对滤波效果的影响程度,总结了其演变规律,对多调谐滤波器在 HVDC 交直流系统中的有效稳定运行及滤波参数

的整定具有一定的工程实用价值和参考意义。

关键词: 高压直流输电; 多调谐滤波器; 参数摄动

0 引言

高压直流输电(HVDC)系统中,由于换流器的非线性,交流系统与直流系统不可避免存在大量的谐波与无功,这将使系统电压波形发生畸变并造成不良影响和危害^[1-11]。因此,谐波抑制与无功补偿一直都是保证 HVDC 输电系统高效稳定运行所必须采取的措施。最早应用于 HVDC 系统交流滤波的是电路结构简单的单调谐滤波器,但人们很快发现该滤波器的基波损耗太大,于是改用二阶高通型和三阶滤波器,而此类滤波器用于低次谐波滤波时,损耗也相对较大。

为解决这类问题,双调谐滤波器被广泛用于现代 HVDC 交直流的谐波抑制中,其主要优点是可同时滤除 2 个频率的谐波,减少高压电抗器及断路器的数量,占地面积小。随着元器件制造水平的提高,三调谐滤波器也于近年应用到直流输电工程,如我国近期投入运行的安顺—肇庆和向家坝—上海 HVDC 输电工程,均采用了多调谐滤波器。

相对于单调谐滤波器,多调谐滤波器由于电路拓扑结构比较复杂(通常由一个串联支路与一个或两个并联支路组成)、调谐次数比较多(一般是 2 次或 3 次调谐),因此,其参数整定就愈发显得重要。此外,电网频率一般随负载及运行工况的变化随机变化,这在一定程度上会使多调谐滤波器存在一定程度的失谐现象,并且,当多调谐滤波器中某些元器件受恶劣环境的影响,或者存在运行损耗而出现

老化时,也会影响其实际的滤波效果。

为揭示多调谐滤波器在非理想工作状态下的运行特性,总结出其串联支路与并联支路发生参数摄动时对滤波效果的影响程度,本文针对目前常见的2类多调谐滤波器,分析了它们的阻抗频率特性,建立了用于研究其参数摄动的分析模型,并将其应用于实际直流输电工程的滤波器参数摄动研究中。

1 多调谐滤波器的特性

1.1 基本工作原理

为便于分析问题,本文先不计及滤波器的基波损耗,对基本结构的多调谐滤波器加以分析。目前实际直流输电工程常用的双调谐滤波器与三调谐滤波器的基本电路拓扑结构如图1所示^[12-15]。

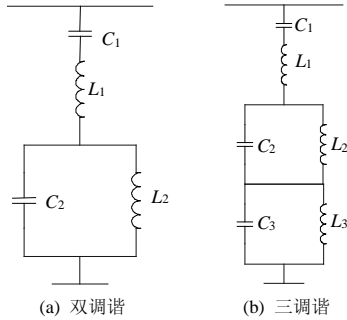


图1 双调谐与三调谐滤波器的基本结构
Fig. 1 Basic structures of double-tuned and multi-tuned filters

图1(a)所示为双调谐滤波器的基本结构。其中:串联支路为主调谐电路,由电感 L_1 和电容 C_1 构成,其谐振频率为 ω_{01} ;并联支路为辅助调谐电路,由电感 L_2 和电容 C_2 构成,其谐振频率为 ω_{02} 。可用式(1)表示

$$\begin{cases} \omega_{01} = 1/\sqrt{L_1 C_1} \\ \omega_{02} = 1/\sqrt{L_2 C_2} \end{cases} \quad (1)$$

若双调谐滤波器的调谐角频率为 ω_1 、 ω_2 ,则谐振频率之间满足如下关系

$$\begin{cases} \omega_1 < \omega_{01} < \omega_2 \\ \omega_1 < \omega_{02} < \omega_2 \end{cases} \quad (2)$$

在分析双调谐滤波器的阻抗频率特性时,可在忽略电抗器的电阻和电容的介质损耗的条件下,建立由式(3)所表示的阻抗表达式

$$Z = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \frac{1}{j\omega C_2 + (1/j\omega L_2)} = \frac{j\omega^4 L_1 L_2 C_1 C_2 - \omega^2(L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_2 C_1) + 1}{j\omega^3 L_2 C_1 C_2 - \omega C_1} \quad (3)$$

在调谐角频率 ω_1 、 ω_2 下双调谐滤波器的谐波阻抗为零,由式(3)可知

$$\omega^4 L_1 L_2 C_1 C_2 - \omega^2(L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_2 C_1) + 1 = 0 \quad (4)$$

求解式(4)可得到双调谐滤波器的调谐角频率 ω_1 、 ω_2 。该式可作为双调谐滤波器参数的校验式,用于校验滤波器串联支路与并联支路的元件参数为非理想参数时,在相应的调谐频率下的频偏程度,从而可用来分析滤波器在发生不同层次的参数摄动时对滤波效果的影响程度。

图1(b)所示为三调谐滤波器的基本电路拓扑结构。其中:电感 L_1 和电容 C_1 构成串联支路(主调谐支路),其谐振频率为 ω_{01} ;电感 L_2 和电容 C_2 构成第一并联支路(辅助调谐支路),其谐振频率为 ω_{02} ;电感 L_3 和电容 C_3 构成第二并联支路(辅助调谐支路),其谐振频率为 ω_{03} 。可用式(5)表示

$$\begin{cases} \omega_{01} = 1/\sqrt{L_1 C_1} \\ \omega_{02} = 1/\sqrt{L_2 C_2} \\ \omega_{03} = 1/\sqrt{L_3 C_3} \end{cases} \quad (5)$$

若三调谐滤波器的调谐角频率为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 ,则谐振频率之间也同样满足如下关系

$$\begin{cases} \omega_1 < \omega_{01} < \omega_2 \\ \omega_1 < \omega_{02} < \omega_2 \\ \omega_1 < \omega_{03} < \omega_2 \end{cases} \quad (6)$$

相应地,三调谐滤波器的阻抗可表示为

$$Z = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L_2}} + \frac{1}{j\omega C_3 + \frac{1}{j\omega L_3}} = \frac{[(\omega^2 L_1 C_1 - 1)(\omega^2 L_2 C_2 - 1)(\omega^2 L_3 C_3 - 1) + j\omega^2 L_2 C_1(1 - \omega^2 L_3 C_3) + \omega^2 L_3 C_1(1 - \omega^2 L_2 C_2)]}{[\omega C_1(1 - \omega^2 L_2 C_2)(1 - \omega^2 L_3 C_3)]} \quad (7)$$

确定三调谐滤波器的基本元件参数后,由式(7)可方便得到滤波器的阻抗频率特性。相应地,可得到用于分析三调谐滤波器参数摄动时,在相应次调谐频率下的频偏程度和滤波效果的数学表达式

$$(\omega^2 L_1 C_1 - 1)(\omega^2 L_2 C_2 - 1)(\omega^2 L_3 C_3 - 1) + \omega^2 L_2 C_1(1 - \omega^2 L_3 C_3) + \omega^2 L_3 C_1(1 - \omega^2 L_2 C_2) = 0 \quad (8)$$

求解式(8)可得到三调谐滤波器的调谐角频率。在滤波器为非理想参数滤波器时,所求得的调谐角频率与设计值相比将会有一定程度的误差,这正是分析多调谐滤波器调谐性能的关键。

1.2 阻抗频率特性

本文将结合实际直流输电工程中的多调谐滤

波器主要参数, 根据 1.1 节所推得的数学表达式, 分析其阻抗频率特性。龙泉换流站 11、13 次双调谐交流滤波器的主要参数见表 1。运用 Matlab 图像处理工具, 由式(2)可得到双调谐滤波器的阻抗频率特性曲线, 如图 2 所示。向家坝换流站 12、24、36 次三调谐直流滤波器的主要参数见表 2, 根据式(7)可相应地得到其阻抗频率特性曲线, 如图 3 所示。

表 1 龙泉换流站双调谐滤波器主要参数
Tab.1 Double-tuned filter's main parameters of Longquan converter station

滤波器型号	$C_1/\mu\text{F}$	L_1/mH	$C_2/\mu\text{F}$	L_2/mH
11/13	1.38	53.76	50.40	1.35

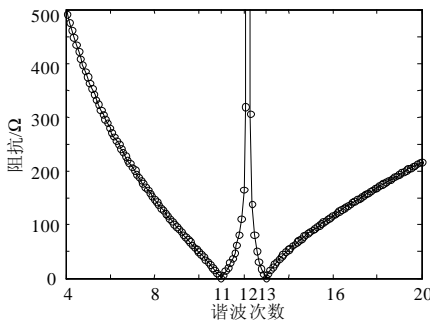


图 2 龙泉换流站双调谐滤波器的阻抗频率特性
Fig. 2 Impedance frequency characteristic of Longquan converter station's double tuned filter

表 2 向家坝换流站三调谐滤波器主要参数
Tab.2 Three-tuned filter's main parameters of Xiangjiaba converter station

滤波器型号	$C_1/\mu\text{F}$	L_1/mH	$C_2/\mu\text{F}$	L_2/mH	$C_3/\mu\text{F}$	L_3/mH
12/24/36	4.000	4.347	11.198	4.153	14.520	0.824

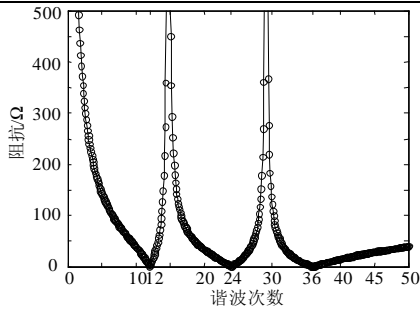


图 3 向家坝换流站三调谐滤波器的阻抗频率特性
Fig. 3 Impedance frequency spectrum of Xiangjiaba converter station's three-tuned filter

对比图 2、3 所示双调谐与三调谐滤波器的阻抗频率特性曲线可见, 双调谐交流滤波器具有较好的调谐锐度, 但由此带来的问题是在滤波器参数摄动而发生频偏时, 其滤波效果将会在一定程度上得不到保证; 三调谐滤波器的调谐锐度相对于双调谐不是很高, 特别是调谐点在 36 次谐波时, 其感性阻抗相对来说呈现出较低阻抗的特性, 这体现了其在对高次谐波进行调谐时频偏灵敏度不是很高的特点。

2 参数摄动影响分析

为对比分析多调谐滤波器串联支路与并联支路各元器件参数的随机变化对调谐频率偏移的影响程度, 根据上述多调谐滤波器运行特性的理论分析与推导, 由龙泉换流站交流双调谐滤波器、向家坝换流站直流三调谐滤波器具体参数, 得到了用于分析参数摄动时对频偏影响程度的图表, 如图 4 和表 3 所示。

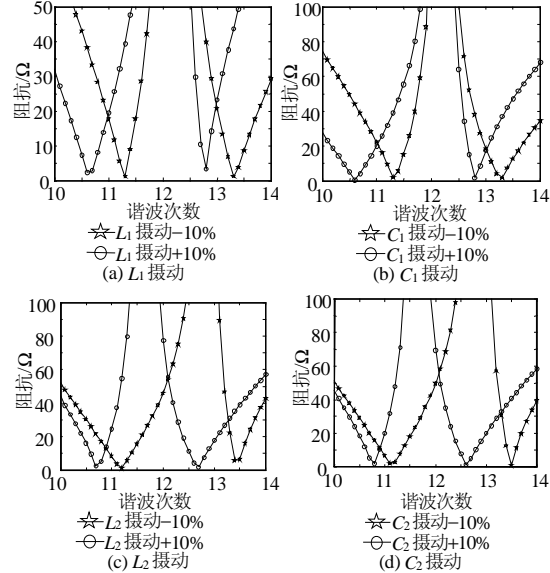


图 4 双调谐滤波器不同参数摄动时的频偏程度
Fig. 4 Frequency shift of double tuned filter's different parameter perturbation

表 3 向家坝换流站直流三调谐滤波器参数摄动对调谐频偏的影响

Tab.3 Frequency shift of three-tuned filter's parameter perturbation of Xiangjiaba converter station

元件参数摄动	调谐频率偏移率/%			
	变化率/%	$\Delta f_1/f_1$	$\Delta f_2/f_2$	$\Delta f_3/f_3$
L_1	-10	0.500	1.542	3.278
	10	-0.417	-1.583	-2.611
C_1	-10	2.167	1.667	1.500
	10	-2.083	-1.500	-1.167
L_2	-10	4.583	0.625	0.139
	10	-4.083	-0.500	-0.111
C_2	-10	3.000	1.583	0.778
	10	-2.750	-1.333	-0.611
L_3	-10	0.167	2.917	2.278
	10	-0.167	-2.833	-1.722
C_3	-10	0.0833	1.917	3.389
	10	-0.025	-2.000	-2.694

图 4(a)~(d)分别为龙泉换流站交流双调谐滤波器串联支路电抗器 L_1 、电容器 C_1 和并联支路电抗器 L_2 、电容器 C_2 参数分别发生 $\pm 10\%$ 的摄动时, 其

调谐频率的偏移情况。可见,对于双调谐滤波器而言,串联支路及并联支路,在元器件参数因某种因素发生摄动而增大时,其调谐频率与未发生参数摄动的情况相比,均会左偏,其偏移程度与参数摄动的程度有直接的关系,且串联支路的电容器参数与并联支路的电抗器参数的摄动对频偏的影响程度较大,这与串联支路提供无功补偿、并联支路承受谐波电压而起到调节调谐频率的阐述相一致。在元器件参数因某种因素发生摄动而减小时,其调谐频率的频偏情况恰与上述分析相反。值得说明的是,调谐频率的向右偏移对滤波器滤波效果的影响较为严重,由于在相应次谐波频率下,其谐波阻抗呈容性,在一定程度上会造成谐波放大,起不到谐波抑制的效果。因此,在发生参数摄动时,应尽量控制并联支路的电抗器参数来避免此种情况的发生。

表3为向家坝换流站直流三调谐滤波器1个串联支路和2个并联支路中电抗器 $L_n(n=1,2,3)$ 和电容器 $C_n(n=1,2,3)$ 分别发生 $\pm 10\%$ 的参数摄动时,其12/24/36次调谐频率的偏移程度,表中 $f_1=600\text{Hz}$ 、 $f_2=1200\text{Hz}$ 、 $f_3=1800\text{Hz}$ 。在上述对于双调谐滤波器参数摄动对频偏影响程度分析结果的基础上,可进一步得到如下结论:

(1) 串联支路和第一个并联支路在发生参数摄动时对低次谐波调谐频率的偏移影响较大,而第二个并联支路在参数摄动时主要影响到高次谐波的频偏。

(2) 考虑同一调谐频率时,串联支路中的电容器参数、2个并联支路中的电抗器参数主要影响到相应次谐波的频偏程度。

(3) 滤波器中元器件发生 -10% 的参数摄动时,在12/24/36各次谐波频率下,其谐波阻抗呈低容抗的特性,在一定程度上会导致谐波放大,应尽量避免此种情况的发生。

(4) 调节串联支路中的电容器参数和2个并联支路中的电抗器参数对频偏的人工调节作用较大,在滤波器元件发生参数摄动时,考虑到系统需要的无功补偿量一定,宜采用主要调节并联支路中的电抗器参数的频偏调节方式。

3 结论

(1) 分析了高压直流输电中多调谐滤波器的基本工作特性,并结合龙泉换流站交流双调谐滤波器和向家坝换流站直流三调谐滤波器的具体参数,

分析了相应的多调谐滤波器的阻抗频率特性。

(2) 通过理论推导建立了用于分析多调谐滤波器参数摄动对谐振频率频偏影响的分析模型,据此可分析出元器件参数摄动对谐振频率变化的方向和大小,并可得出具体的等值频率偏差。

(3) 结合具体的多调谐滤波器参数,分析了HVDC工程常用的多调谐滤波器中串联支路与并联支路各参数发生摄动对频偏的影响程度,并由分析结果得出了多调谐滤波器在非理想参数下的工作特性、拓扑电路中各元器件参数摄动对频偏的影响程度、对谐波的实际抑制效果等结论,为实际工程中多调谐滤波器的设计及工作特性的分析提供了参考依据,具有一定的工程实用价值。

参考文献

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 曾艳, 任震, 余涛. 基于调制迭代谐波分析法的交直流混联输电系统多谐波源研究[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 26-29.
Zeng Yan, Ren Zhen, Yu Tao. Study on multi-harmonic sources in AC/DC hybrid transmission system based on modulation and iterative harmonic analysis method[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 26-29(in Chinese).
- [3] 李战鹰, 任震, 曾坚勇. 多馈入直流输电系统交流侧滤波方案的设计[J]. 电网技术, 2005, 29(7): 27-30.
Li Zhanying, Ren Zhen, Zeng Jianyong. Design of filtering scheme at ac side of multi-infeed DC power transmission system[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 27-30(in Chinese).
- [4] 任震, 曾坚永, 张勇军. 基于遗传算法的直流输电系统中混合交流滤波器的优化设计[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 22-25.
Ren Zhen, Zeng Jianyong, Zhang Yongjun. Optimized design of hybrid AC filter for HVDC system based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 22-25(in Chinese).
- [5] 吴国沛, 任震, 唐卓尧. 高压直流输电系统双调谐滤波器特性研究[J]. 电网技术, 1999, 23(8): 32-34.
Wu Guopei, Ren Zhen, Tang Zhuoyao. Characteristic analysis of double-turned filter in HVDC system[J]. Power System Technology, 1999, 23(8): 32-34(in Chinese).
- [6] 解大, 张延迟, 吴非, 等. 并联型电力有源滤波器的直流侧电压控制和补偿电流反馈控制[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 18-21.
Xie Da, Zhang Yanchi, Wu Fei, et al. A new-style shunt active power filter based on DC capacitor voltage control and compensation current feedback control[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 18-21(in Chinese).
- [7] 任震, 曾艳, 戴保明. 高压直流输电系统中C型阻尼滤波器的优化模型及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 123-126.
Ren Zhen, Zeng Yan, Dai Baoming. Optimization model and algorithm of type-C damped filter in high voltage direct current transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 123-126(in Chinese).

(下转第66页 continued on page 66)