

电阻器安装位置对双调谐滤波器性能影响的分析

曹洋, 任军辉

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要:双调谐滤波器是目前高压直流工程中采用最普遍的交流滤波器,其中电阻的阻值大小和连接方式均影响滤波器的滤波性能。本文介绍了双调谐滤波器中电阻器的常规阻值选择和连接方式,对采用不同的电阻器阻值和连接方式的滤波器性能进行研究。通过计算研究滤波器阻抗—频率特性,分析不同滤波电阻器配置下的双调谐滤波器滤波性能,并以典型高压直流输电工程为例,给出配置原则和建议,对实际工程滤波器的设计具有一定的指导作用。

关键词:滤波器; 电阻; 连接方式; 滤波性能

Analysis on Influence of Installation Position of Resistor on Double Tuned Filters Performance

CAO Yang, REN Junhui

(Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The double-tuned filter is at present the most common forms of AC filters for HVDC projects, of which both magnitude of resistance and connection mode of the resistor can affect the filtering performance of the filter. In this paper, the conventional resistances selection and connection mode of the double-tuned filter resistors are introduced. The filter performance of the resistor with different resistance and connection mode is studied. The impedance-frequency characteristics of the filter is studied by calculation, the filtering performance of the double-tuned filter under different filter resistor configurations is analyzed. The typical HVDC transmission projects is taken as an example, the configuration principles and suggestions are given, which has a certain guiding effect on the design of the filter for actual project.

Keywords: filter; resistor; connection mode; filtering performance

0 引言

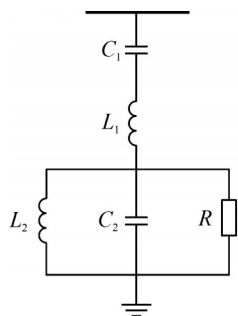
在电力系统中,减少谐波的手段中应用最多的是无源滤波器,他既可以进行谐波抑制,还可以进行无功补偿^[1-4]。滤波器是高压换流站中重要的组成部分,通常占常规高压直流换流站相当大一部分^[5-6],加上所需的开关场设备,交流滤波器占高压直流方案总面积的一半以上。此外滤波器设计研究的范围广泛且设计过程复杂,需要反复循环计算^[7],会影响换流站设计的其他方面和整个工程进度。快速准确地配置不同工程所需的滤波器对高压直流换流站设计十分重要。

无源滤波器的电路型式多种多样,主要有单调谐滤波器、双调谐滤波器、高通滤波器、C型滤波器等几种形式^[8]。其中,双调谐滤波器可以滤除两个

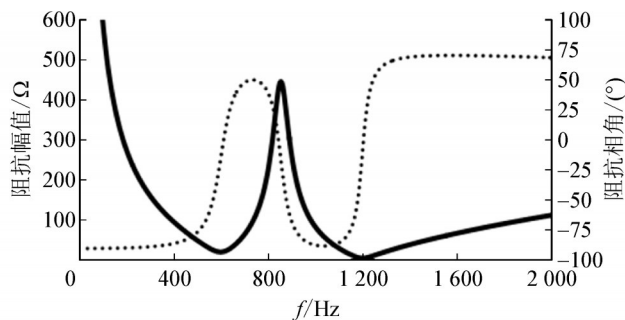
频率带的谐波,比两个独立的单调谐滤波器技术经济性更好,只有一个处于高电位的电容器,便于解决低输送功率时的滤波问题,滤波器种类减少,设备备品更少,便于维护,是目前高压直流工程应用最普遍的滤波器形式。双调谐滤波器是由电容、电感和电阻3种无源元件构成的。目前国内外学者关于滤波器性能的研究主要集中在电容和电抗的参数优化、滤波器无功补偿容量、滤波器的调谐频率及调谐锐度等方面^[9-12]。电阻器阻值及其连接方式对滤波性能同样会产生很大影响,阻尼式双调谐滤波器具有滤波范围广、失谐灵敏度低以及高频阻尼性好等优点^[13],但这方面研究较少。为此,有必要研究电阻器阻值及其连接方式对滤波器性能的影响。

所有无源滤波器的性能都依赖于其阻抗—频率特性,因此本文通过滤波器阻抗—频率特性对比

分析电阻器对滤波性能的影响。本文介绍4种不同的电阻器连接方式,通过计算分析滤波器配置不同电阻器阻值和连接方式时的阻抗—频率特性,并与实际工程结合,总结滤波器配置不同电阻器的利弊,为降低滤波器设计的盲目性与减少反复计算的工作量提供有力依据^[14]。



(a) 双调谐滤波器接线



(b) 阻抗—频率特性

图1 典型双调谐滤波器接线和阻抗—频率特性

Fig. 1 Wiring and impedance-frequency characteristics of typical double-tuned filter

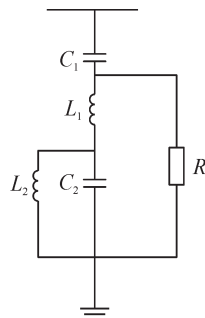
滤波器阻抗为 C_1 容抗、 L_1 感抗与下端并联支路

阻抗 $Z_p(f)$ 之和,公式为

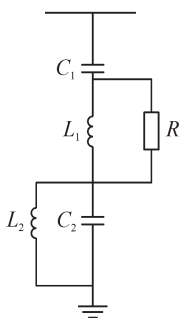
$$Z(f) = Z_p(f) + j(2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_1})$$

支路阻抗 $Z_p(f)$ 公式为

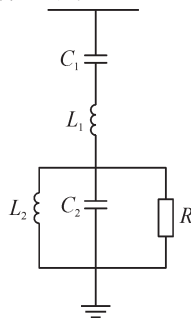
$$Z_p(f) = \frac{1}{S_p(f)}$$



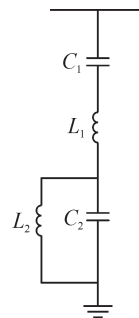
(a) A型



(b) B型



(c) C型



(d) D型

图2 4类双调谐滤波器拓扑结构

Fig. 2 Topological structures for four types of double-tuned filters

A型:带电阻器,电阻器接在高压电抗器高压端与地之间,如图2(a)所示。

B型:带电阻器,电阻器与高压电抗器并联,如图2(b)所示。

C型:带电阻器,电阻器与低压电抗器并联,如图2(c)所示。

D型:不带电阻器,如图2(d)所示。

2.2 阻抗—频率特性分析

图3为4类双调谐滤波器的阻抗—频率特性比较。图中所示为4类调谐点在600 Hz/1 200 Hz的双调谐滤波器在0~2 500 Hz频率范围内的阻抗特性,除是否配电阻器或者电阻器的连接位置有所

1 双调谐滤波器及其阻抗—频率特性

双调谐滤波器包括电容器、电抗器和电阻器,其中电容器、电抗器连接位置已确定,电阻器是否需要以及其连接方式由最终设计确定。典型的双调谐滤波器原理接线和阻抗—频率特性如图1所示。

2 电阻连接方式对滤波效果的影响

2.1 双调谐滤波器电阻连接方式

根据电阻器连接方式,将双调谐滤波器分为4类,分别命名为A型、B型、C型和D型,如图2所示。

不同外,滤波器的其他配置完全相同。

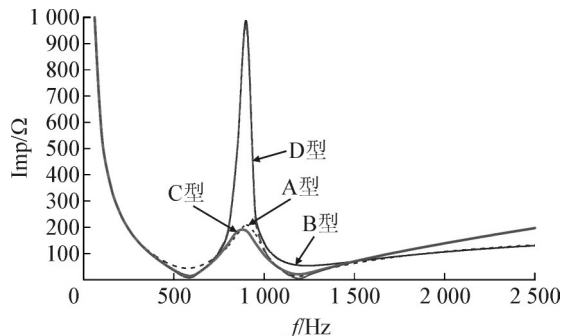


图3 4种双调谐滤波器阻抗—频率特性比较

Fig. 3 Comparison of impedance-frequency characteristics of four types of double-tuned filters

根据图3分析得出:

1)在第1个调谐点(即600 Hz)处,B型、C型和D型的阻抗基本相同且明显低于A型,说明A型滤波器在第1个调谐点处的滤波效果较差;

2)在第2个调谐点(即1 200 Hz)处,D型滤波器的阻抗最低,其次依次为A型和C型,B型明显高于其他3种,说明B型滤波器在第2个调谐点的滤波效果较差;

3)A型和B型具有相同的高通特性,而C型和D型滤波器对高次谐波的滤波效果弱于A型和B型;

4)B型和D型滤波器在两个调谐点之间有一个明显的并联谐振点,阻抗非常高,这会造成下端并联的电抗器和电容器上的非特征次谐波电压较高,从而导致流过他们的电流较大,而A型和C型在此点的阻抗远远小于B型和D型。

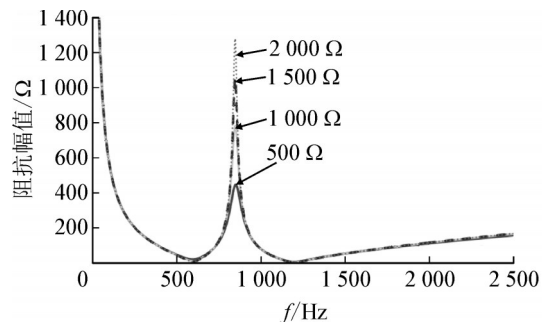
3 电阻器阻值大小对滤波性能的影响

在工程应用中,通过配置合适的电阻值可使双调谐滤波器在高频部分产生阻尼滤波作用,滤波电阻器常规选型为200 Ω ~2 000 Ω 。下文对上述4种类型双调谐滤波器分别进行电阻器阻值大小对滤波性能影响的分析。

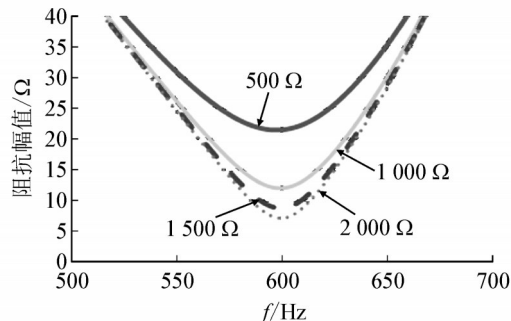
3.1 电阻器阻值的大小对A型滤波器滤波性能的影响分析

不同阻值的A型双调谐滤波器阻抗—频率特性见图4。图4中(a)为分别配置500 Ω 、1 000 Ω 、1 500 Ω 和2 000 Ω 4种阻值电阻器的A型双调谐滤波器在0~2 500 Hz频率范围内的阻抗—频率特性图。图(b)和图(c)分别为4种阻值电阻器的A型双调谐滤波器在调谐点600 Hz和1 200 Hz附近的阻抗—频率特性局部放大图。除所配电阻器阻值有所不同外,滤波器的其他配置完全相同。

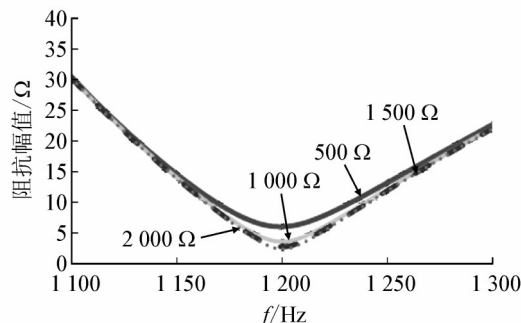
可以得出结论:随着滤波电阻器阻值增大,滤波器调谐点处阻抗减小,其减小程度随阻值的增大而减弱。第1个调谐点附近阻抗变化程度较第2个调谐点附近更明显。同时,随着滤波电阻器阻值增大,会在滤波器两个调谐点之间产生一个越明显的并联谐振点。这会造成下端并联的电抗器和电容器上的非特征次谐波电压较大,导致电流较大,引发电容器局部放电强度增大、熔丝熔断,滤波器设备绝缘老化、寿命缩短。并联谐振点阻抗越大,还会造成低压元件的暂态定值较高,提高了避雷器的配置要求,以上这些都会对滤波器的经济性造成影响。



(a) 不同阻值的A型双调谐滤波器阻抗—频率特性



(b) 调谐点(600 Hz)附近



(c) 调谐点(1 200 Hz)附近

图4 不同阻值的A型双调谐滤波器阻抗—频率特性
Fig. 4 Impedance-frequency characteristics of type A double-tuned filters with different resistance

3.2 电阻器阻值大小对B型滤波器滤波性能的影响

不同阻值的B型双调谐滤波器阻抗—频率特性见图5。图5中(a)为分别配置500 Ω 、1 000 Ω 、1 500 Ω 和2 000 Ω 4种阻值电阻器的B型双调谐滤波器在0~2 500 Hz频率范围内的阻抗—频率特性图。图5(b)、图5(c)和图5(d)分别为4种阻值电阻器的B型双调谐滤波器在两调谐点之间的并联谐振点附近、调谐点1 200 Hz附近和调谐点600 Hz附近的阻抗—频率特性局部放大图。除所配电阻器阻值有所不同外,滤波器的其他配置完全相同。

可以得出结论:阻值改变对B型双调谐滤波器在第1个调谐点附近及并联谐振点处阻抗影响不大,受阻值影响变化较大处为第2个调谐点附近及高频处。随着滤波电阻器阻值增大,滤波器在第1个调谐点、两调谐点之间并联谐振点及第2个调谐点附近阻抗减小,高频处阻抗增大。

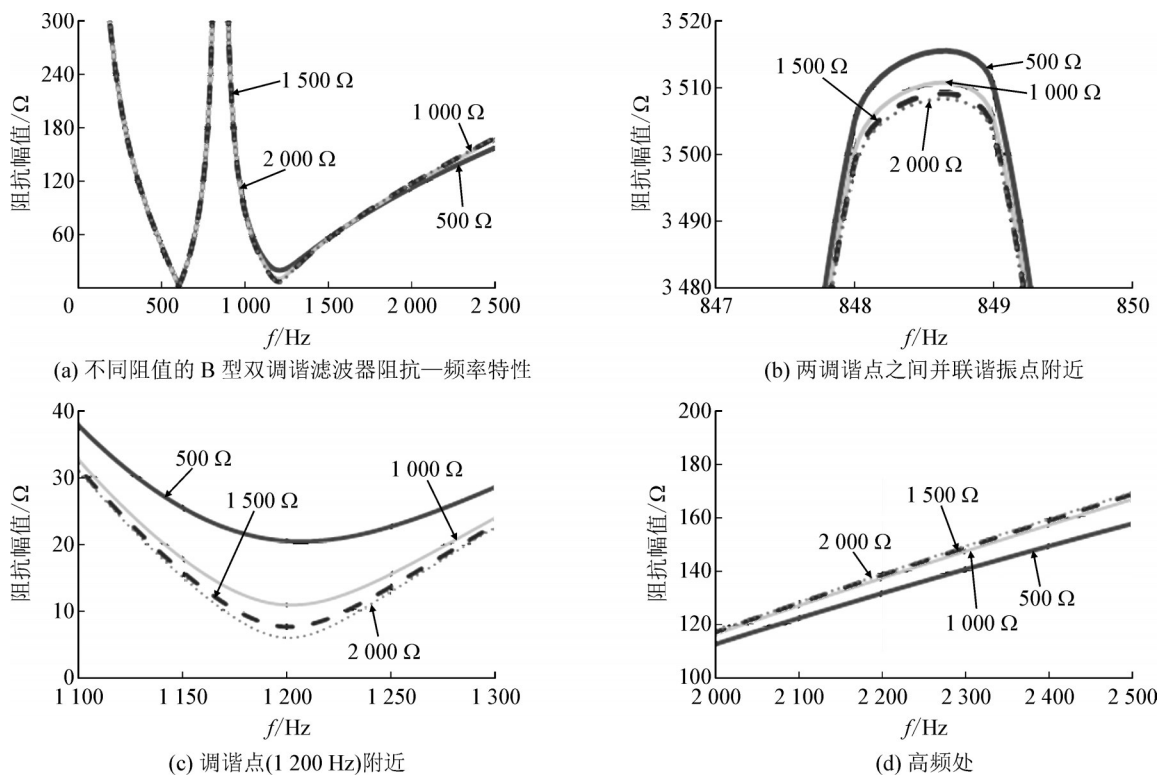


图5 不同阻值的B型双调谐滤波器阻抗—频率特性

Fig. 5 Impedance-frequency characteristics of type B double-tuned filters with different resistance

3.3 电阻器阻值的大小对C型滤波器滤波性能的影响分析

不同阻值的 C 型双调谐滤波器阻抗—频率特性见图 6。图 6 中(a)为分别配置 500 Ω、1 000 Ω、1 500 Ω和 2 000 Ω 4 种阻值电阻器的 C 型双调谐滤

波器在 0 ~ 2 500 Hz 频率范围内的阻抗—频率特性图。图(b)和图(c)为 4 种阻值电阻器的 C 型双调谐滤波器在调谐点 600 Hz 和 1 200 Hz 附近的阻抗—频率特性局部放大图。除所配电阻器阻值有所不同外,滤波器的其他配置完全相同。

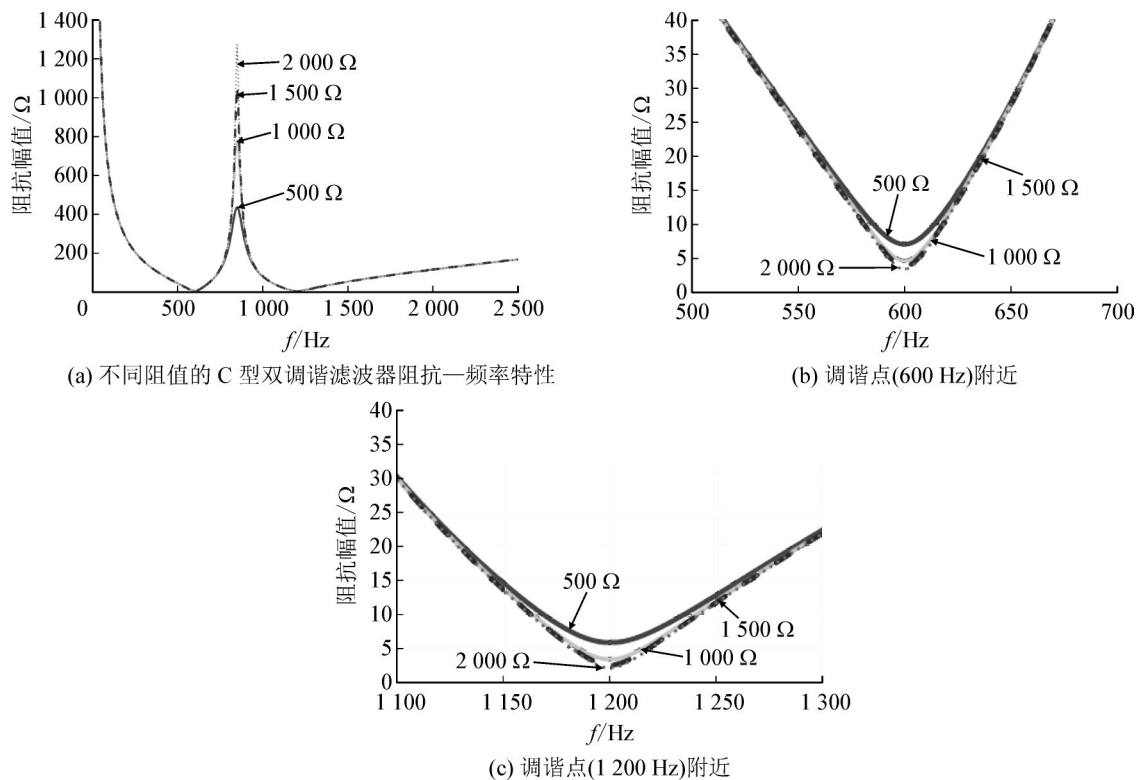


图6 不同阻值的C型双调谐滤波器阻抗—频率特性

Fig. 6 Impedance-frequency characteristics of type C double-tuned filters with different resistance

可以得出结论:C型双调谐滤波器随滤波电阻器阻值增大的阻抗—频率特性曲线与A型双调谐滤波器类似,但是变化程度较A型双调谐滤波器更不明显,尤其在第1个调谐点附近。

4 实例分析

以实际工程为例,分析不同工程双调谐滤波器配置原则。国内典型高压直流输电工程双调谐滤波器配置及类型见表1。

表1 典型工程双调谐滤波器配置
Table 1 Double tuned filter configuration in typical projects

典型工程	三上工程 宜都站	锦苏工程 裕隆站	滇西北工程 东方站	鲁西工程 云南侧
双调谐滤波器配置	HP 11/13 HP 24/36	HP 24/36	DT 11/24 DT 13/36	DT 11/24 DT 13/36
双调谐滤波器类型	A型	A型	B型	B型

各站在双极全压工况下额定功率时,注入交流母线的主要特征次谐波电流见表2,各站主要次特征谐波含有率见表3。

表2 双极全压工况下额定功率时,注入交流母线的主要特征次谐波电流
Table 2 The main characteristic harmonic current injected into the AC bus at rated power under bipolar full voltage condition

基波或谐波次数	三上工程 宜都站	锦苏工程 裕隆站	滇西北工程 东方站	鲁西工程 云南侧
1	3 722.7	4 555.2	3 114.79	1 244.2
11	180.03	186.7	127.54	50.88
13	112.55	105.3	75	29.86
23	34.45	44.7	28.76	11.48
25	35.36	39.7	26.99	10.77
35	12.48	17.6	6.91	2.73
37	12.49	16.9	9.49	3.77

表3 主要次特征谐波含有率
Table 3 Main sub-characteristic harmonic contents %

谐波次数	三上工程 宜都站	锦苏工程 裕隆站	滇西北工程 东方站	鲁西工程 云南侧
11	4.29	3.68	3.69	3.48
13	2.68	2.08	2.17	1.96
23+25	1.59	1.66	1.61	1.6
35+37	0.6	0.68	0.47	0.53

分析可知,宜都站11次谐波含量是13次谐波含量的1.6倍,东方站11次谐波含量是13次谐波含量的1.7倍,相比较之下,宜都站需要增强13次

谐波处滤波性能,东方站需要增强11次谐波处滤波性能。宜都站35次和37次谐波含量高于东方站,宜都站需要增强36次谐波处滤波性能。因此,宜都站采用增强第2个调谐点处滤波性能的A型HP 11/13和HP 24/36双调谐滤波器,东方站采用增强第1个调谐点处滤波器性能的B型DT 11/24和DT 13/36双调谐滤波器。东方站将11/13次滤波器分开配置,可以减小元件应力,并避免失谐引起的谐振点偏移^[15]。

对于裕隆站,35次和37次谐波含量较高,因此采用增强第2个调谐点处滤波性能的A型HP 24/36双调谐滤波器。对于鲁西工程云南侧,11次谐波含量是13次谐波含量的1.78倍,因此采用增强第1个调谐点处滤波器性能的B型DT 11/24双调谐滤波器。

综上所述,在配置高压直流输电工程滤波器时,分析流入交流母线的谐波电流频谱,根据滤波需求选择电阻器安装位置,可以快速确定滤波器基本配置。

5 滤波器配置原则

根据上述分析,对于电力系统滤波器设计可以得到以下原则:

1)滤波电阻器连接方式不同会导致滤波性能有差异。进行电力系统滤波器设计时,优先选择A型、B型滤波器。当需要增强第1个调谐点处滤波性能时,优先选择B型、C型、D型滤波器。当需要增强第2个调谐点处滤波性能时,优先选择A型、C型滤波器。当需要增强高次谐波处滤波性能时,优先选择A型和B型滤波器;

2)滤波电阻器阻值不同会导致滤波性能有差异。阻值越大,4种双调谐滤波器调谐点处阻抗均越小,但随着频率升高至一定高频处,阻值越大,阻抗越大。当选择A型滤波器时,阻值改变对第1个调谐点处滤波性能影响较大。当选择B型滤波器时,阻值改变对第2个调谐点处滤波性能影响较大。随着阻值的改变,A型滤波器滤波效果变化程度最大,其滤波效果近似于同时采用B型、C型电阻连接方式的滤波器;

3)滤波电阻器阻值越小,电阻器连接方式对滤波性能的影响越大。滤波电阻器阻值越大,电阻器连接方式对滤波性能的影响越小。

6 结语

滤波器设计本身是一个反复计算、不断优化的

过程,需要考虑的工况十分多且计算量大,滤波电阻器的选取更是在一定程度依赖设计者的经验。本文介绍了电力系统中滤波电阻器常规选型及连接方式,通过计算研究不同阻值及连接方式的滤波器阻抗—频率特性,比较滤波器滤波性能差异,总结得到滤波器配置原则。本文综合分析了电阻器对双调谐滤波器性能的影响,在实际工程中可以很好地提高滤波器的设计效率。

参考文献

- [1] 刘天作,赵文诗,张泽强. 锡盟换流站交流滤波器不平衡保护误动作分析[J]. 东北电力技术,2022,43(5):49-53.
LIU Tianzuo,ZHAO Wenshi,ZHANG Zeqiang. Analysis of AC filter unbalanced protection misoperation in ximeng converter station[J]. Northeast Electric Power Technology,2022,43(5):49-53.
- [2] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [3] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [4] 雷潇,廖文龙,白欢,等. 一起换流站直流滤波器干式电抗器过电压损坏分析[J]. 电瓷避雷器,2022(4):140-145.
LEI Xiao,LIAO Wenlong,BAI Huan,et al. Fault analysis of dry-type air-core reactor of dc filter in hvdc substation caused by overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(4):140-145.
- [5] 贾东瑞,谢兴利,常伯涛,等. 特高压直流换流站交流滤波器组空气间隙优化[J]. 河北电力技术,2018,37(2):5-7.
JIA Dongrui,XIE Xingli,CHANG Baitao,et al. Optimization of air gap clearance in UHV converter station AC filter[J]. Hebei Electric Power,2018,37(2):5-7.
- [6] 马云龙,杨建明,卢宇,等. 龙政直流工程交流滤波器过负荷保护的标准化改造[J]. 浙江电力,2023,42(1):23-30.
MA Yunlong,YANG Jianming,LU Yu,et al. Standardized retrofit of AC filter overload protection in Longquan-Zhengping HVDC transmission project[J]. Zhejiang Electric Power,2023,42(1):23-30.
- [7] 文俊,孟伟,殷威杨,等. ± 800 kV 特高压直流输电工程交流滤波器优化设计[J]. 高电压技术,2010,36(4):912-917.
WEN Jun,MENG Wei,YIN Weiyang,et al. Optimizing design of AC filters of ± 800 kV UHVDC transmission projects[J]. High Voltage Engineering,2010,36(4):912-917.
- [8] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [9] 瞿祎,欧阳曾恺,朱虹,等. 基于改进高斯滤波器的含锁相环PV-BES微电网的孤岛检测和无缝切换控制[J]. 电网与清洁能源,2022,38(7):38-46.
QU Yi,OUYANG Zengkai,ZHU Hong,et al. Island detection and seamless switching control of PV-BES microgrid with phase-locked loop based on improved gaussian filter[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(7):38-46.
- [10] 马永翔,权学红,闫群民,等. 基于PI+QPR控制的单相有源电力滤波器研究[J]. 电测与仪表,2023,60(3):165-171.
MA Yongxiang,QUAN Xuehong,YAN Qunmin,et al. Study on the single-phase active power filter based on PI+QPR control[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(3):165-171.
- [11] 王成亮,石凡,王宏华,等. 基于改进多目标粒子群的HVDC交流滤波器优化设计[J]. 电测与仪表,2023,60(4):57-63.
Wang Chengliang,Shi Fan,Wang Honghua,et al. Optimization design of AC filters for HVDC system based on improved multiobjective particle swarm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(4):57-63.
- [12] 刘成民. 无源滤波器组的综合优化设计[J]. 电网技术,1997(11):49-51.
LIU Chengmin. Comprehensive optimization design of passive filter bank[J]. Power System Technology,1997(11):49-51.
- [13] 宋钢,张新燕,陈鑫. 阻尼式双调谐滤波器在HVDC换流站中的分析[J]. 电力学报,2014,29(4):283-287.
SONG Gang,ZHANG Xinyan,CHEN Xin. The analysis of the damping type double tuned filter in HVDC converter station[J]. Journal of Electric Power,2014,29(4):283-287.
- [14] 辛清明,黄莹,邱伟,等. 高压直流输电系统阻尼型双调谐交流滤波器的优化设计[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):218-223.
XIN Qingming,HUANG Ying,QIU Wei,et al. Optimal design of damping type double tuned AC filter in HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):218-223.
- [15] 黄莹,黎小林,饶宏,等. 云广 ± 800 kV直流输电工程交流滤波器设计关键问题研究[J]. 南方电网技术,2010,4(2):67-71.
HUANG Ying,LI Xiaolin,RAO Hong,et al. Study on the key issues of AC filter design for Yunnan-Guangdong ± 800 kV DC transmission project[J]. Southern Power System Technology,2010,4(2):67-71.

作者简介:

曹洋(1991—),女,工程师,从事高压直流输电技术工作。

E-mail:caoy@xd.cee-group.cn。

任军辉(1979—),男,正高级工程师,从事高压直流输电技术及柔性直流输电技术工作。