

参数失谐对基于滤波器的高压直流输电系统 直流侧谐波电压测量的影响

毛涛¹, 乐健¹, 黄银龙¹, 罗汉武²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 将测量的高压直流输电系统直流侧滤波器电流进行傅里叶分解得到各次谐波电流, 结合滤波器已知的阻抗-频率特性计算得到直流侧的谐波电压。推导了采用常规直流单调谐滤波器时谐波电压测量误差与参数失谐度之间的关系, 分析了不同元件的失谐度对各次谐波电压测量的影响和谐波电压测量误差对滤波器元件参数失谐的灵敏度。仿真计算结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 滤波器; 直流滤波器; 谐波电压测量; 高压直流输电; 灵敏度分析; 参数失谐

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.014

0 引言

高压直流输电(HVDC)技术在远距离、大容量输电方面具有强大的优势, 但其在换流过程中会产生大量谐波, 不仅严重影响电能质量, 而且威胁到直流输电系统的安全稳定运行^[1-2]。为了掌握高压直流输电系统的实时谐波状况, 分析直流滤波器设计的正确性和实行运行状态, 迫切需要对高压直流输电系统直流侧的谐波进行准确测量, 开展相应谐波电压测量方法的研究具有现实意义和实用价值。

目前的高压基波电压测量主要采用电容式电压互感器(CVT), 但谐波情况下 CVT 的工频谐振条件被打破, 谐波电压测量存在较大误差^[3]。总体而言, 目前缺乏准确可靠且性价比高的高压谐波电压测量手段。高压直流输电系统直流滤波器并联于直流母线上, 为实现直流测谐波电压的测量提供了必要的条件。文献[4]提出了一种改进的任意整数次谐波电压检测方法, 提出采用双 dq 变换方法分别检测出正序电压分量和负序电压分量, 通过预设双 dq 坐标变换矩阵中的频率实现对特定次谐波的检测, 但该方法实现过程复杂。文献[5]提出了一种基于两谱线的加权平均来修正幅值的双峰谱线修正算法, 利用距谐波频点最近的 2 根离散频谱幅值估计出待求谐波的幅值; 利用多项式逼近方法获得频率和幅值的修正公式, 可进一步降低泄漏和噪声干扰, 提高谐波分析的准确性。但该方法需要高精度的数模转换器, 且检测速度较慢。文献[6]提出了一种电力系统谐波检测的抗混叠小波分析方法, 通过将谐波信号

分解成不同频带的子频带信号, 再利用连续小波变换对非零子频带信号进行分析, 提取谐波分量特征。但该方法提取的谐波分量特征精度不高。

在本文提出的利用直流滤波器实现高压直流输电系统直流侧谐波电压测量的方案中, 滤波器的元件的实际运行值会由于环境因素、元件老化以及制造误差等偏离标称值, 导致滤波器实际调谐频率与设计值存在一定偏差^[7-8], 不仅达不到预想的滤波效果, 而且将给本文所提谐波电压测量方法带来误差。文献[9]分析了直流和交流滤波器的调谐特性以及滤波器参数失谐的概率关系; 文献[10]从灵敏度的角度分析了单调谐和双调谐滤波器的元件参数变化率与等值失谐度的关系; 文献[11]指出滤波器参数失谐将会对高压直流输电系统的可靠运行产生重要的影响; 文献[12]论述了一种基于滤波器等效原则的适用于工程实际的直流滤波器参数可调节的设计方法; 文献[13-14]提出了高压直流交流滤波器参数的计算与直流滤波器的设计方法; 文献[15-16]提出了滤波器失谐检测的方法。这些为本文分析谐波电压测量误差提供了参考。

本文提出了一种在传统直流侧滤波器各支路中串入电流互感器的高压直流输电系统直流侧谐波电压测量的新方法。该方法对测量得到的电流进行傅里叶分解, 根据各次谐波电流并结合已知的滤波器的阻抗-频率特性即可计算得到直流侧的各次谐波电压。本文重点研究了滤波器元件失谐度与各次谐波电压测量误差关系的理论表达式, 分析了不同元件失谐对谐波电压测量的影响。通过灵敏度分析法, 研究了谐波电压测量相对元件参数微变的敏感度。最后通过仿真计算验证了本文提出方法的正确性和有效性。

收稿日期: 2014-12-23; 修回日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007065)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51007065)

1 基于滤波器的谐波电压测量方法

1.1 测量原理

本文所提出的谐波电压测量原理如图 1 所示。

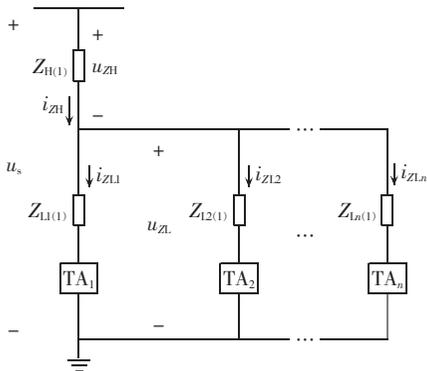


图 1 基于滤波器的谐波电压测量原理
Fig.1 Principle of filter-based harmonic voltage measuring

目前高压直流输电系统直流侧滤波器的主电路可分为上、下 2 个部分,上半部分通常只含有 1 条支路,如图 1 中所示的基波阻抗为 $Z_{H(1)}$ 的部分。下半部分通常由多个支路并联构成,基波阻抗分别为 $Z_{L1(1)}$ 、 $Z_{L2(1)}$ 、 \dots 、 $Z_{Ln(1)}$ 。本文提出的直流侧谐波电压测量方法为在直流侧滤波器的下半部分的各并联支路中分别串入电流互感器 TA_1 、 TA_2 、 \dots 、 TA_n 。同时为了降低对 TA_1 、 TA_2 、 \dots 、 TA_n 的绝缘要求,各电流互感器需串入各并联支路靠近接地点的部分。

1.2 谐波电压计算方法

首先可根据测量得到的电流求解得到上半支路流过的电流 i_{ZH} :

$$i_{ZH} = \sum_{k=1}^n i_{ZLk} \quad (1)$$

然后对 i_{ZH} 进行傅里叶分解,求解得到电流 i_{ZH} 的第 h 次谐波的有效值 $I_{ZH(h)}$ 和相位角 $\theta_{ZH(h)}$ ($h=1, 2, \dots, m$, 其中 m 为所关注的谐波最高次数)。

直流滤波器的阻抗-频率特性在设计时即已经获知,通过该特性曲线可得到 h 次谐波下直流侧滤波器的阻抗幅值 $Z_{(h)}$ 和相位角 $\varphi_{(h)}$,则高压直流输电系统直流侧电压 u_s 中的第 h 次谐波电压的计算方法为:

$$U_{s(h)} = I_{ZH(h)} Z_{(h)} \angle (\varphi_{(h)} + \theta_{ZH(h)}) \quad (2)$$

对所有次谐波均进行上述所示的计算,即可计算出 u_s 的各次谐波电压。

以图 2 所示的常规直流双调谐滤波器为例来说明上述方法的具体实现。图 2 中的 TA_1 和 TA_2 为串入的电流互感器。图 3 为该双调谐滤波器的阻抗-频率特性。例如可查出在 15 次谐波下该滤波器的阻抗幅值和相位角分别 378Ω 和 89° ,结合计算得到的第 15 次谐波的有效值 $I_{ZH(15)}$ 和相位角 $\theta_{ZH(15)}$,根据

式(2),则直流侧电压 u_s 的 15 次谐波电压为:

$$U_{s(15)} = I_{ZH(15)} \times 378 \angle (89^\circ + \theta_{ZH(15)})$$

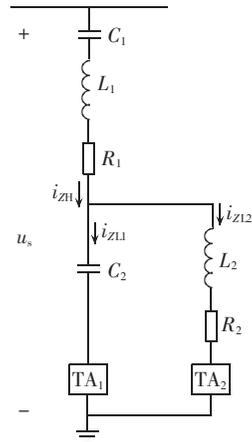


图 2 直流侧双调谐滤波器结构
Fig.2 Structure of double-tuned filter at DC side

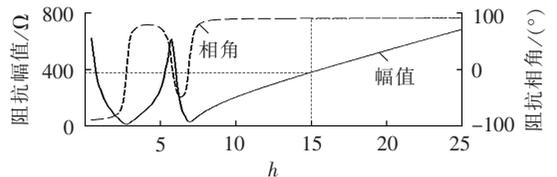


图 3 双调谐滤波器的阻抗-频率特性
Fig.3 Impedance-frequency characteristics of double-tuned filter

可以看到,该方法可快速方便地实现高性价比的高压直流输电系统直流侧电压的各次谐波电压计算。

本文提出的高压直流输电系统直流侧谐波电压测量方法仅需在常规直流侧滤波器的基础上进行简单的改造,计算简单方便,为实现高压直流谐波电压的精确测量提供了较好的技术手段。

2 参数失谐时的谐波电压测量误差计算

在实际运行中,由于允许的制造误差、元件老化、环境温度变化等将造成滤波器中电抗器及电容器实际运行值偏离标称值,此外系统工作频率的波动,也会导致滤波器实际调谐频率与设计值存在一定偏差,直流滤波器达不到预想的滤波效果。本文将以图 4(a)所示 12/24 次单调谐滤波器来分析滤波器元件失谐对谐波电压测量的影响,12/24 次单调谐滤波器的阻抗频率特性如图 4(b)所示。图中, Z_1 、 φ_1 和 Z_2 、 φ_2 分别为 12 次和 24 次单调谐滤波器的阻抗幅值和阻抗相角。

该滤波器的阻抗为:

$$Z(\omega) = j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) + R \quad (3)$$

发生谐振时 $\omega = \omega_1$; 当 $\omega < \omega_1$ 时, $Z(\omega)$ 呈容性; 当 $\omega > \omega_1$ 时, $Z(\omega)$ 呈感性。

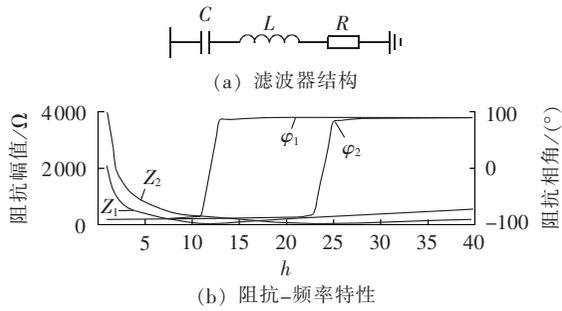


图 4 12/24 次单调谐滤波器

Fig.4 12/24-order single-tuned filter

定义滤波器元件 C 的失谐度为:

$$\delta_C = \frac{C_{\text{new}} - C_{\text{ref}}}{C_{\text{ref}}} \times 100\% \quad (4)$$

其中, C_{new} 和 C_{ref} 分别为电容 C 失谐后的值和设计值。滤波器中其他元件的失谐度的定义类似式(4)。

定义 h 次谐波电压幅值的测量误差为:

$$\delta_{U_{s(h)}} = \frac{U_{s(h)(\text{mis})} - U_{s(h)(\text{real})}}{U_{s(h)(\text{real})}} \times 100\% \quad (5)$$

其中, $U_{s(h)(\text{mis})}$ 为根据式(2)并利用未失谐时滤波器阻抗-频率特性计算得到的 h 次谐波电压幅值; $U_{s(h)(\text{real})}$ 为实际 h 次谐波电压的幅值。

根据式(2)和式(3)并结合电容 C 的失谐度,式(5)可改写为:

$$\delta_{U_{s(h)}} = \left[\frac{|R + Z_{L(h)} - (1 + \delta_C)Z_{C(h)}|}{|R + Z_{L(h)} - Z_{C(h)}|} - 1 \right] \times 100\% \quad (6)$$

其中, $Z_{L(h)}$ 为 h 次谐波下滤波器的电感幅值; $Z_{C(h)}$ 为 h 次谐波下滤波器的电容幅值。

类似式(6)也可求得电感 L 失谐时的谐波电压测量误差。图 5 给出了 L 和 C 不同失谐度下 6 次和 24 次谐波电压测量误差的变化。

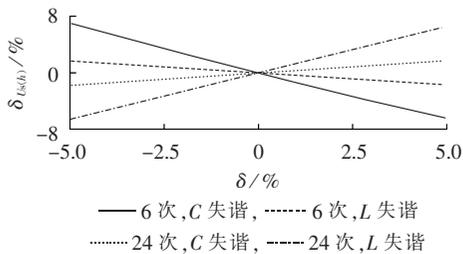


图 5 谐波电压测量误差与滤波器元件失谐度的关系

Fig.5 Relationship between harmonic voltage measurement error and filter component detuning degree

通过分析图 5 可发现如下规律。

a. 不同元件失谐对谐波电压幅值测量误差的影响不同。在失谐度相同时,对谐波次数低于 12 次的谐波电压, C 失谐时的测量误差均比 L 失谐时的大。例如当失谐度的大小为 5% 时, C 失谐时 6 次谐波电压测量误差为 7%, 而 L 失谐时误差最大为 1.8%。对谐波次数高于 12 次的谐波电压, L 失谐时的测量误差均比 C 失谐时的大。例如, 当失谐度的大小

为 5% 时, L 失谐时 24 次谐波电压测量误差最大为 6.8%, 而 C 失谐时误差最大为 1.9%。

b. 同一元件失谐时对不同次数谐波电压测量误差的影响不同。在失谐度相同的情况下,谐波次数越低时的谐波电压测量误差越大。例如在失谐度为 -5% 时, C 失谐时 6 和 24 次谐波电压测量误差分别为 7% 和 -1.9%。

c. 失谐度越大时,各次谐波电压的测量误差也越大,且测量误差关于 0 点不对称。例如, L 失谐时,失谐度为 -5% 和 5% 时 24 次谐波电压的测量误差分别为 -6.6% 和 6.8%。

d. 谐波次数大于 12 次和小于 12 次时的谐波电压测量误差的方向不同,例如,当 C 失谐且失谐度在 -5% ~ 0 之间时,高于 12 次的谐波电压测量误差为负,而低于 12 次的谐波电压测量误差为正。

综合以上分析可知,滤波器元件失谐将会给本文提出的谐波电压测量方法引入一定的误差,且不同元件失谐时的影响不同。对于小于 12 次的谐波电压,电容 C 失谐时引入的测量误差较大;对于大于 12 次的谐波电压,电感 L 失谐时引入的测量误差较大。

3 电压测量误差对参数失谐的灵敏度分析

当 12 次滤波器的元件参数发生微小变化时,谐波测量方法所得到的电压测量误差也会发生变化,进行谐波电压幅值测量误差对元件失谐的灵敏度分析有助于了解对测量误差影响最大的元件。

由式(2)可知,当测量的电流相同时,电压幅值误差只与阻抗幅值有关,即电压测量误差对元件失谐的灵敏度可转化为阻抗幅值对元件失谐灵敏度的分析。

根据式(3),分别对各元件参数求导取模,可得:

$$\begin{cases} \left| \frac{dZ}{dL} \right| = \omega \\ \left| \frac{dZ}{dC} \right| = \frac{1}{\omega C^2} \end{cases} \quad (7)$$

根据相对灵敏度公式:

$$\begin{cases} S_C^{|Z|} = \left| \frac{dZ}{Z} \right| \bigg/ \frac{dC}{C} \\ S_L^{|Z|} = \left| \frac{dZ}{Z} \right| \bigg/ \frac{dL}{L} \end{cases} \quad (8)$$

可得到本文中分析的双调谐滤波器的相对灵敏度为:

$$\begin{cases} S_L^{|Z|} = \frac{L}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \omega \\ S_C^{|Z|} = \frac{1}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \frac{1}{\omega C} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $S_L^{|Z|}$ 、 $S_C^{|Z|}$ 分别为该双调谐滤波器阻抗幅值 $|Z|$

对元件 L 、 C 的相对灵敏度。图 6 为上述灵敏度随谐波次数变化的规律。

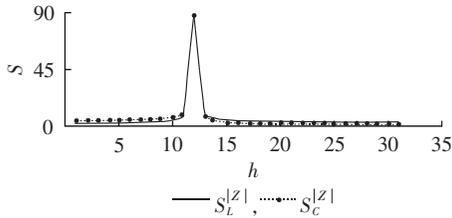


图 6 滤波器阻抗幅值对元件参数变化的相对灵敏度

Fig.6 Relative sensitivity of filter impedance amplitude to component parameter variation

根据图 6 可得出如下规律。

a. 滤波器阻抗幅值对元件参数的相对灵敏度因元件的不同而不同。谐波次数小于 12 次时,该 12 次滤波器的阻抗幅值对元件 C 的微变最为灵敏;谐波次数大于 12 次时,该 12 次滤波器的阻抗幅值对元件 L 的微变最为灵敏;仅在 12 次谐波时变化较大,这主要是由于这 2 个元件决定了双调谐滤波器的 12 次谐振频率,当元件参数微变时阻抗变化较大。

b. 对同一元件而言,滤波器阻抗幅值对元件参数的相对灵敏度与谐波频率相关,谐波次数小于 12 次时,滤波器阻抗幅值对 L 和 C 的相对灵敏度随着谐波次数的增大而逐渐增大,谐波次数为 12 次时,出现陡增;而谐波次数大于 12 次时,滤波器阻抗幅值对 L 和 C 的相对灵敏度随着谐波次数的增大而逐渐减小至趋于 0。

4 电流测量精度的影响

高压直流输电系统的直流侧可能具有不同特性的滤波器,本文提出的谐波电压测量方法可应用于任一滤波器中。但由于不同的滤波器的阻抗-频率特性不同,在电流测量具有一定误差时,将会对谐波电压测量的精度产生影响。

由式(2)可知,对于第 h 次谐波,计算得到的谐波电压幅值为:

$$U_{s(h)} = I_{ZH(h)} Z_{(h)} \quad (10)$$

谐波电压相位为:

$$\phi_{(h)} = \varphi_{(h)} + \theta_{ZH(h)} \quad (11)$$

设电流测量所引入的第 h 次谐波电流幅值的测量误差为 $\Delta i_{(h)}$,则 h 次谐波电压的测量误差为:

$$\Delta u_{(h)} = \Delta i_{(h)} Z_{(h)} \quad (12)$$

可见, h 次谐波滤波器的阻抗幅值越小,相应地该次谐波电压幅值的测量误差也越小。

通过具有图 4 所示阻抗-频率特性的 12 次和 24 次滤波器分别测量直流输电系统直流侧第 6 次和第 36 次谐波电压。为了验证上文的分析结果,分别对电流表测得的电流值加入一微小误差,该误差为流

过 2 个电流表较小电流的 0.5%。图 7 和图 8 分别为 2 个滤波器测量得到的 6 次和 36 次谐波有效值。

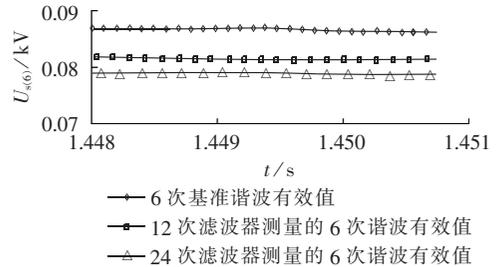


图 7 不同滤波器测得的 6 次谐波电压有效值

Fig.7 RMS of 6th-order harmonic voltage measured by different filters

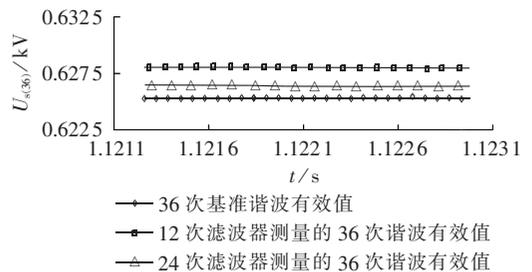


图 8 不同滤波器测得的 36 次谐波电压有效值

Fig.8 RMS of 36th-order harmonic voltage measured by different filters

由图 4 可知,测量 6 次谐波时 24 次谐波滤波器的阻抗值较大,而测量 36 次谐波时 12 次谐波滤波器的阻抗值较大。根据上述分析,对 6 次谐波电压的测量,采用 12 次滤波器测量的结果较为准确;而对 36 次谐波电压的测量,采用 24 次谐波滤波器测量的结果较为准确。

由图 7 可以看出,12 次滤波器测得的 6 次谐波电压更接近其实际值,而由图 8 可以看出 24 次滤波器测得的 36 次谐波电压更接近其实际值。仿真结果验证了分析结论的正确性。

通过以上的理论分析与仿真验证,结合图 4 可以得出结论如下:对于本文所应用的 2 个单调谐滤波器,对 17 次及以上较高次数谐波电压的测量,由于 24 次谐波滤波器的阻抗值较小,故 24 次滤波器的测量结果更为准确;而对于低于 17 次的谐波电压的测量,则 12 次滤波器的测量结果更为准确。

5 仿真计算

利用 PSCAD 自带的 HVDC Benchmark 模型进行仿真计算。该系统整流侧与逆变侧均采用 2 个 6 脉冲换流桥组成的 12 脉冲换流装置,在直流侧系统中将产生 12、24 次等特征谐波,故在直流侧分别接入调谐频率分别为 12 次和 24 次的 2 个单调谐滤波器。

以 12 次滤波器为例,分别考虑其电容值偏离额定值 $\pm 5\%$ 和电感值偏离额定值 $\pm 5\%$ 的情况,电容和

电感的取值如表 1 所示。同时也给出所测 24 次谐波电流、谐波电压的数据如表 2 所示。

表 1 滤波器的失谐参数

Table 1 Mismatched filter parameters

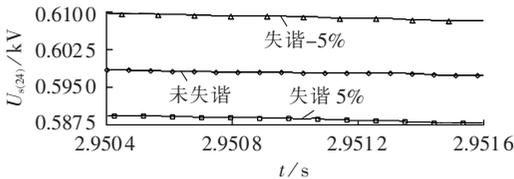
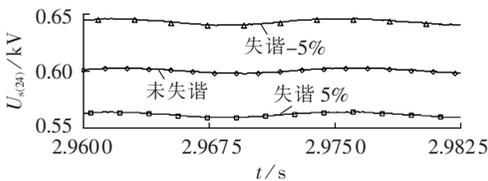
元件	额定值	仿真取值	
		偏离-5%	偏离 5%
L	46.908 mH	44.5626 mH	49.2534 mH
C	1.5 μF	1.425 μF	1.575 μF

表 2 测量的 24 次谐波电流与谐波电压幅值

Table 2 Measured 24th-order harmonic currents and voltages

参数	参数值			
	L 失谐-5%	L 失谐 5%	C 失谐-5%	C 失谐 5%
$U_{s(24)}$	0.6 kV	0.6 kV	0.0598 kV	0.0598 kV
$I_{24(24)}$	0.00328 kA	0.00316 kA	0.00344 kA	0.003 kA

图 9、10 分别为仿真得到的电容和电感失谐时测量得到的 24 次谐波电压的有效值。

图 9 电容 C 失谐 $\pm 5\%$ 时的 24 次谐波电压Fig.9 24th-order harmonic voltage when C deviates for $\pm 5\%$ 图 10 电感 L 失谐 $\pm 5\%$ 时的 24 次谐波电压Fig.10 24th-order harmonic voltage when L deviates for $\pm 5\%$

根据仿真结果可以看到:滤波器各元件参数分别失谐 $\pm 5\%$ 时, $\delta_{U_{s(24)}}$ 与理论推导基本相符,如 L 失谐 5% 时,仿真得到的 $\delta_{U_{s(24)}}$ 为 6.9%,而理论推导的结果为 6.8%;失谐 -5% 时,仿真得到的 $\delta_{U_{s(24)}}$ 为 -6.7%,而理论推导的结果为 -6.6%;仿真验证了当 L 失谐时对 24 次谐波电压幅值测量的影响最大,而 C 失谐时对 24 次谐波电压幅值测量的影响较小。

6 结论

本文开展了基于滤波器的高压直流输电系统直流侧电压测量方法的研究,重点分析了滤波器元件参数失谐时对谐波电压的影响,结果表明当滤波器元件参数失谐时,将会使得单次谐波电压的测量值偏离实际值,对谐波次数低于 12 次的谐波电压, C 失谐对测量结果的影响较大,而 L 失谐对测量结果的影

响较小;对谐波次数高于 12 次的谐波电压,测量结果相反。这说明本文提出的谐波电压测量方法具有一定的测量精度和工程实用价值。本文分析了谐波电压测量结果相对元件失谐的相对灵敏度,谐波次数低于 12 次时,谐波电压测量误差对元件 C 的微变最为灵敏;谐波次数高于 12 次时,谐波电压测量误差对元件 L 的微变最为灵敏。通过仿真计算验证了本文所提出方法和分析结论的正确性和有效性。本文对设计具有较高性价比的高压直流输电系统直流侧谐波电压测量手段具有参考价值。

参考文献:

- [1] 罗隆福,俞华,刘福生,等. 高压直流输电系统中双调谐滤波器参数研究及其仿真[J]. 电力自动化设备,2006,26(10):25-27.
LUO Longfu, YU Hua, LIU Fusheng, et al. Study on parameters of double tuned filter in HVDC transmission system and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10):25-27.
- [2] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):10-15.
TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9):10-15.
- [3] 李一泉,何奔腾,黄瀛. 基于电容式电压互感器暂态误差估计的自适应距离保护[J]. 中国电机工程学报,2004,24(10):72-76.
LI Yiquan, HE Benteng, HUANG Ying. An adaptive distance relay based on transient error estimation of CVT[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10):72-76.
- [4] 张庆超,刘劲磊. 一种改进的任意整数次谐波电压测量方法[J]. 电网技术,2007,31(18):48-52.
ZHANG Qingchao, LIU Jinlei. An improved method to detect random integer order harmonic voltage[J]. Power System Technology, 2007, 31(18):48-52.
- [5] 庞浩,李东霞,焜云霄,等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):50-54.
PANG Hao, LI Dongxia, ZU Yunxiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6):50-54.
- [6] 杜天军,陈光祚,雷勇. 基于混叠补偿小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):54-60.
DU Tianjun, CHEN Guangzuo, LEI Yong. A novel method for power system harmonic detection based on wavelet transform with aliasing compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3):54-60.
- [7] 同向前,薛均义. 电力调谐滤波器的最佳调谐设计[J]. 电工技术学报,2005,20(4):98-101.
TONG Xiangqian, XUE Junyi. Tuned power filter with optimal tuned frequency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(4):98-101.
- [8] 库晓斐,蔡泽祥,徐敏. 高压直流输电系统交流滤波器故障与保护分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):150-155.
KU Xiaofei, CAI Zexiang, XU Min. AC filter fault analysis and protection of high-voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19):150-155.

- [9] 龙启,杨方明. 南方电网交直流滤波器调谐特性分析[J]. 南方电网技术,2012,6(5):76-78.
LONG Qi,YANG Fangming. AC & DC filter tuning characteristics analysis of southern power grid[J]. Southern Power System Technology,2012,6(5):76-78.
- [10] 王刚,罗慧卉,黄敏,等. 基于粗糙集的三调谐直流滤波器失谐故障元件检测方法[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):81-87.
WANG Gang,LUO Huihui,HUANG Min,et al. A rough-set based detection method for detuning components in a triple-tuned DC filter [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(20):81-87.
- [11] 宋国兵,褚旭. 利用滤波器支路电流的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):120-126.
SONG Guobing,CHU Xu. A whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end current of DC-filters[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):120-126.
- [12] 王峰,徐政,薛英林. 参数可调节的高压直流输电系统直流滤波器设计方案[J]. 高电压技术,2011,37(4):1035-1040.
WANG Feng,XU Zheng,XUE Yinglin. DC filter design with parameters adjustable for HVDC transmission [J]. High Voltage Engineering,2011,37(4):1035-1040.
- [13] 李普明,徐政,黄莹. 高压直流输电交流滤波器参数的计算[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):115-121.
LI Puming,XU Zheng,HUANG Ying. Algorithm for the parameters of AC filters in HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(12):115-121.
- [14] 宋蕾,文俊,同金春,等. 高压直流输电系统直流滤波器的设计

[J]. 高电压技术,2008,34(4):647-651.

SONG Lei,WEN Jun,YAN Jinchun,et al. Design of DC filters in HVDC transmission system [J]. High Voltage Engineering,2008,34(4):647-651.

[15] 魏春枝,张小虎. 特高压直流滤波器的失谐检测及保护[J]. 技术与市场,2013,20(12):112-114.

WEI Chunzhi,ZHANG Xiaohu. HVDC filter detuning detection and protection [J]. Technology and Market,2013,20(12):112-114.

[16] 罗慧卉. 高压/特高压三调谐直流滤波器失谐故障元件检测方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.

LUO Huihui. Research on detuning detection approach of triple-tuned DC filter for HVDC and UHVDC transmission project [D]. Guangzhou:South China University of Technology,2011.

作者简介:



毛涛

毛涛(1986—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事微电网运行与控制技术方面的研究;

乐健(1975—),男,湖北黄冈人,副教授,博士,主要从事电能质量控制技术、智能电网运行与控制技术方面的研究(E-mail:

lej01@mails.tsinghua.edu.cn);

黄银龙(1990—),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事智能电网方面的研究;

罗汉武(1975—),男,湖北黄石人,高级工程师,博士,从事电力企业管理工作。

Influence of parameter mismatch on filter-based harmonic voltage measuring for DC side of HVDC transmission system

MAO Tao¹,LE Jian¹,HUANG Yinlong¹,LUO Hanwu²

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;

2. East Inner Mongolia Electric Power Limited Company,Hohhot 010020,China)

Abstract: Fourier decomposition is applied to the DC-side filter current measurements of HVDC transmission system to obtain the harmonic currents of different orders and the impedance-frequency characteristics of the filter is adopted to calculate the corresponding harmonic voltages. The relationship between the error of harmonic voltage measurements and the parameter mismatch is deduced for the normal single-tuned filter, and the effect of detuning degree on the harmonic voltage measurement is analyzed for different elements, as well as the sensitivity of harmonic voltage measuring error to the filter parameter mismatch. The results of simulative calculation show the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: electric filters; DC filter; harmonic voltage measuring; HVDC power transmission; sensitivity analysis; parameter mismatch