

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191055

# 直流输电系统孤岛运行交流滤波器设备能力评估方法

辛清明, 赵晓斌, 黄莹, 郭龙, 卢毓欣

(直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510080)

**摘要:** 高压直流输电系统在孤岛运行方式下, 若发生系统故障, 交流系统频率会出现较大范围的变化, 将增大交流滤波器元件的电流。通过对直流输电系统孤岛故障条件下频率变化的分析, 研究了频率变化对交流滤波器元件额定电流的影响。基于单调谐滤波器的阻频特性, 提出了多调谐滤波器频率波动条件下的定值计算方法。据此分析了交流系统条件和滤波器参数对设备定值随频率变化的影响, 提出了在孤岛条件下交流滤波器设备能力的评估方法。通过与仿真结果的对比, 验证了所提方法的有效性。

**关键词:** 高压直流输电; 孤岛运行方式; 频率变化; 交流滤波器定值

## Method for evaluating AC filter equipment capability of islanding operation in an HVDC transmission system

XIN Qingming, ZHAO Xiaobin, HUANG Ying, GUO Long, LU Yuxin

(State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute Co., China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** When an HVDC power transmission system is operating in isolated island mode, if a system failure occurs, the frequency of the AC system will change over a large range. This will increase the current of the AC filter element. In this paper, the influence of the frequency change on the rated current of the AC filter components is studied by analyzing the frequency change under the conditions of the island fault of the HVDC transmission project. Based on the characteristics of the frequency-supplied filter of a single-tuned filter, a method for calculating the settling value under multi-tuned filter frequency fluctuation is proposed. On this basis, the influence of the conditions of the AC system and the parameters of the filter on the fluctuation of the device setting with frequency fluctuation is analyzed. A method for evaluating the capabilities of AC filter equipment under island conditions is proposed. Simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. ZBKJXM20170065).

**Key words:** HVDC transmission system; island operation; frequency variation; rating of AC filter

## 0 引言

高压直流输电系统送端孤岛运行是指送端不与主网连接, 只与发电厂连接送电的特殊方式。这种运行方式可以减少直流跳闸后潮流转移对交流系统的影响, 在改善远距离送电的系统稳定性, 提高送电能力等方面有着独特的优势。在直流系统运行中, 将主动或被动进入孤岛状态作为正常运行方式之一, 并要求完成相关的调试试验。在孤岛方式下,

由于送端与主网没有电气联系, 其短路容量小于联网方式, 使得交直流间的相互影响更为明显。尤其是当直流系统发生单极闭锁时, 交流系统频率将大幅变化, 影响交流场的相关设备<sup>[1-3]</sup>。

为保证交流系统的电能质量, 需要配置滤波器装置对谐波进行治理<sup>[4]</sup>。传统基于晶闸管的高压直流输电系统交流滤波器依靠固定的调谐点完成滤波功能, 而交流系统频率的大范围波动将可能导致流入滤波器内的谐波电流增大, 超出滤波器的设计要求。

文献[1-2]研究送端孤岛运行对交流滤波器的影响, 文献[1]主要从孤岛运行方式的系统谐波阻抗变

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (ZBKJXM20170065)

化的角度来分析对交流滤波器的影响。文献[2]主要从孤岛运行过电压角度研究了对交流滤波器的影响。

文献[5-7]介绍了直流输电工程交流滤波器稳态定值的计算方法, 该方法中将频率变化与滤波器元件参数变化综合考虑。但该方法并没有研究频率变化与稳态定值之间的关系, 且其考虑的频率范围较小, 通常为 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ <sup>[8-9]</sup>。在孤岛方式故障情况下, 系统频率变化范围远大于 $\pm 0.5 \text{ Hz}$ 。若采用常规的设计流程校核孤岛条件下的交流滤波器设备定值, 则其定值是正常频率变化范围的数倍。若以此定值作为交流滤波器设备的设计要求, 设备成本、体积和重量将增加。因此, 针对孤岛运行工况, 不能采用传统设计流程对交流滤波器设备定值进行校核。

文献[10]研究了频率变化对交流滤波器设计的影响, 但仅考虑其对单调谐滤波器的影响, 而频率变化对双调谐滤波器的影响更为复杂, 在高压直流输电系统中研究频率变化与双调谐交流滤波器的关系更为必要。

本文研究了孤岛运行方式下的频率变化, 同时分析了传统交流滤波器定值计算原理, 并说明在大频率变化下设备定值增加的原因。本文引入谐波电流分流比的概念<sup>[11]</sup>, 推导了计及不同滤波器类型及投切组合的谐波电流分流比计算公式, 着重分析了交流系统阻抗、交流滤波器投切组合对谐波电流分流比的影响。针对不同类型的交流滤波器, 研究了频率变化对不同次的谐波电流分流比的影响, 进而分析频率变化大小与总谐波电流的关系, 从理论上分析了频率变化对交流滤波器设备定值的影响。

## 1 交流滤波器稳态定值计算原理

交流滤波器设备稳态定值即交流滤波器各元件(电容器、电抗器、电阻器)的额定电压和电流。交流滤波器各元件的额定电压为基波及各次谐波电压的算数和, 而额定电流通常为基波及各次谐波电流的几何和。

根据国内直流输电工程的设计及运行经验, 换流站通常配置 2~3 种交流滤波器。双调谐滤波器具有损耗低, 占用面积小, 投资省, 便于备用和维护等特点, 是目前直流输电工程采用最普遍的滤波器形式之一<sup>[11-13]</sup>。三调谐交流滤波器也逐渐被应用到高压直流输电系统中来。交流滤波器型式结构如图 1 所示。

交流滤波器的调谐点通常配置在直流输电系统交流侧特征次谐波附近, 最常用的调谐点为 11 次、13 次、24 次和 36 次<sup>[14-20]</sup>。

稳态定值计算模型如图 2 所示。交流滤波器稳态应力主要由两部分构成, 第一部分为换流器谐波

电流产生的应力, 第二部分为系统背景谐波电压产生的应力, 二者采用叠加原理来进行计算<sup>[3]</sup>。在孤岛条件下, 由于送端换流站不与交流系统相连, 可不考虑系统背景谐波电压产生的应力。

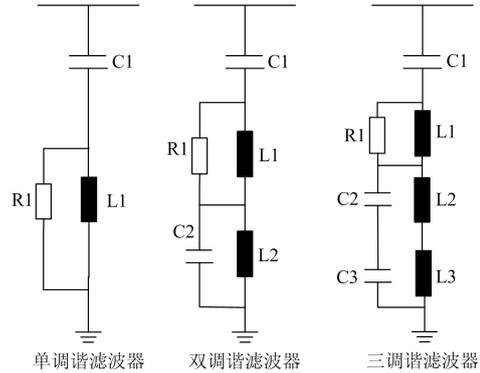


图 1 直流输电工程常用交流滤波器型式

Fig. 1 Classic AC filter types of DC projects

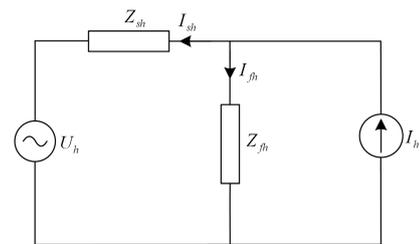


图 2 交流滤波器定值计算原理图

Fig. 2 Schematic of AC filter static rating calculation

图 2 中  $I_h$  为换流站的  $h$  次谐波电流源,  $U_h$  为交流系统  $h$  次背景谐波电压源,  $Z_{fh}$  为交流滤波器的  $h$  次等效阻抗, 而  $Z_{sh}$  是从换流站交流母线向系统看入的  $h$  次系统谐波阻抗。系统运行方式或网络结构的变化, 对系统谐波阻抗的影响十分显著。根据研究经验, 2~13 次谐波阻抗用阻抗扇形图描述; 14 次及以上的谐波阻抗用阻抗圆表示。谐波阻抗圆中包含的阻抗除考虑系统运行影响外, 还考虑系统频率偏差<sup>[3]</sup>。

## 2 送端孤岛运行条件下的频率变化

孤岛运行方式是直流输电系统中一种特殊的运行方式, 当送端交流系统解列或检修的情况下, 直流送端会出现孤岛运行方式<sup>[21-26]</sup>。由于送端孤岛系统与主电网之间仅依靠直流输电线路相联系, 因此当直流系统发生故障闭锁时, 送端孤岛系统的频率将发生大幅的变化。文献[21]研究了云广直流实际孤岛运行时闭锁条件下的频率变化, 并与孤岛闭锁调试的试验波形对比, 交流系统频率最大为 64 Hz。

如图 3 所示为某直流系统孤岛运行发生单极闭

锁时交流母线频率变化的曲线。0 s 时直流孤岛运行发生单极闭锁故障, 故障后 9.1 s 孤岛系统频率达到最高值 67.5 Hz。频率偏差大于±5 Hz 的持续时间为 12 s, 频率偏差大于±2 Hz 的持续时间为 28 s, 频率偏差大于±1 Hz 的持续时间为 33 s, 频率偏差大于±0.5 Hz 的持续时间为 38 s。交流系统稳态频率波动范围通常为±0.2 Hz, 上述范围远远超过正常的波动范围。

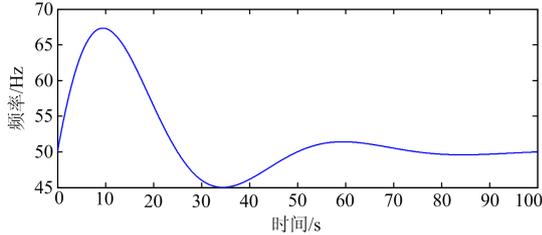


图3 直流系统孤岛运行单极闭锁时交流母线频率变化曲线  
Fig. 3 AC bus frequency variation curve under the monopolar lockout of the isolated island operation

在发生双极闭锁时, 交流滤波器采取快速切除的保护措施, 孤岛频率变化对交流滤波器设备无影响; 当发生单极闭锁时, 由于未故障极仍在运行, 交流滤波器不能全部切除, 部分滤波器必须承受孤岛系统的频率变化。

系统频率偏差将使交流滤波器发生失谐, 滤波器的调谐点发生改变, 影响滤波器的滤波性能。同时, 由于交流滤波器与交流系统存在固有的并联谐振频率, 当系统频率发生偏差时, 谐波频率可能趋近于并联谐振频率, 导致发生并联谐振, 这不仅增加了系统运行的风险, 同时流过交流滤波器的谐波电流也会增大。若谐波电流超过交流滤波器的设计定值, 将引起交流滤波器保护动作, 甚至导致双极闭锁。

虽然传统交流滤波器计算方法中也对频率变化进行了考虑, 但通常仅考虑暂态频率变化, 一般为±0.5 Hz 左右, 孤岛故障条件下的频率变化远超过暂态频率变化的范围。同时, 传统算法计算的结果作为稳态要求, 即要求设备长期可耐受该额定值, 孤岛闭锁条件下的频率变化为一个短期的过程, 因此若采用传统计算方法计算上述频率偏差下的设备额定值, 将使交流滤波器设备的定值要求过大, 增大设备投资, 增加设备占地。

### 3 频率变化对交流滤波器定值的影响分析

#### 3.1 频率变化对特征次谐波电流的影响

如上文所述, 高压直流输电系统中所用交流滤波器通常形式为双调谐或三调谐交流滤波器, 而多调谐滤波器可采用多个并联的单调谐滤波器等效。

单调谐滤波器的阻抗表达式如式(1)所示。

$$Z_{fh} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

式中:  $L_1$  为电抗器电感值;  $C_1$  为电容器电容值;  $\omega$  为交流系统角频率, 其表达式如式(2)所示。

$$\omega = h\delta\omega_0 \quad (2)$$

式中:  $h$  为谐波次数;  $\omega_0$  为交流系统规定基频角频率;  $\delta$  为频率比, 为实际交流系统基频频率与规定基频频率的比值。

设单调谐滤波器的基频容量为  $Q$ , 交流系统的额定电压有效值为  $U_s$ , 则有

$$C_1 = \frac{Q}{U_s^2 \omega_0} \quad (3)$$

设单调谐滤波器的调谐次数为  $N$ , 则有

$$L_1 = \frac{U_s^2}{\omega_0 Q N^2} \quad (4)$$

综上, 单调谐交流滤波器的阻抗表达式为

$$Z_{fh} = j \frac{U_s^2}{Q} \left( \frac{h\delta}{N^2} - \frac{1}{h\delta} \right) \quad (5)$$

考虑到阻尼型多调谐滤波器电阻的影响, 上述表达式中将增加阻性相。文献[17]中分析了阻尼电阻对交流滤波器阻抗特性的影响, 电阻对滤波器阻抗特性增加的阻性项可表示为

$$R_{fh} = \frac{X_{fhR}^2}{R} \quad (6)$$

式中:  $X_{fhR}$  为与阻尼电阻并联的阻抗值; 而  $R$  为阻尼电阻值。

考虑电阻后的滤波器阻抗表达式为

$$Z_{fh} = j \frac{U_s^2}{Q} \left( \frac{h\delta}{N^2} - \frac{1}{h\delta} \right) + R_{fh} \quad (7)$$

因高压直流输电系统产生的特征次谐波远大于非特征次谐波, 因此交流滤波器中主要的电流为特征次谐波电流。交流滤波器的调谐点也设置在特征次谐波上。

而在调谐点附近, 双调谐或三调谐滤波器的阻抗特性与相同调谐点的单调谐滤波器阻抗特性接近, 可近似采用单调谐滤波器阻抗特性来计算。

如图2所示, 交流滤波器与交流系统阻抗并联, 设流入已投入交流滤波器的电流为  $I_{fh}$ , 谐波电流源的电流为  $I_h$ , 则可定义已投入交流滤波器谐波电流分流比  $K_h$  如式(8)所示。

$$K_h = \left| \frac{I_{fh}}{I_h} \right| = \frac{1}{\left| \frac{Z_{fh}}{Z_{sh}} + \frac{Z_{fh}}{Z_{fall}} \right|} \quad (8)$$

式中:  $Z_{sh}$  为交流系统的  $h$  次谐波阻抗;  $Z_{fhall}$  为换流站所有交流滤波器  $h$  次谐波等效阻抗;  $Z_{fh}$  为所计算的交流滤波器的  $h$  次谐波阻抗。

假设调谐点为  $N$  的多调谐滤波器投入的组数为  $M$  组, 则所有投入的交流滤波器的阻抗可表达为

$$\frac{Z_{fh}}{Z_{fhall}} = M \quad (9)$$

$Z_{sh}$  为交流系统的谐波阻抗,  $X_{sh}$  为其虚部,  $R_{sh}$  为其实部。当交流系统运行方式一定时, 交流系统频率出现偏差, 对交流系统阻抗的影响较小。因此, 在频率偏差范围内可近似认为交流系统的谐波阻抗不发生变化。

$$Z_{sh} = R_{sh} + jX_{sh} \quad (10)$$

则有

$$\frac{Z_{fh}}{Z_{sh}} = \frac{R_{fh} + jX_{fh}}{R_{sh} + jX_{sh}} \approx \frac{X_{fh}}{X_{sh}}(1 + j\cot\theta) - j\frac{R_{fh}}{X_{sh}} \quad (11)$$

式中,  $\theta$  为交流系统谐波阻抗角。

将上式代入公式(8)中则有

$$K_N(\delta) = \frac{1}{\left| M + \frac{U_s^2}{QX_{sN}} \left( \frac{\delta^2 - 1}{\delta} \right) (1 + j\cot\theta) - j\frac{R_{fh}}{X_{sN}} \right|} \quad (12)$$

$$A = \frac{U_s^2}{NQX_{sN}} = \frac{Q_{sN}}{NQ}, \quad B = \frac{R_{fh}}{X_{sN}}, \quad \text{其中 } A \text{ 代表系}$$

统的  $N$  次谐波无功容量与滤波器  $N$  次谐波无功容量的比值,  $B$  代表滤波器  $N$  次等效阻尼电阻与系统  $N$  次阻抗的比值。在实际设计中, 考虑滤波器在调谐点处的滤波性能, 等效阻尼电阻往往较小, 因此  $B$  的值一般远小于 1。

令  $x = \frac{\delta^2 - 1}{\delta}$ , 则有

$$K_N(\delta) = \frac{1}{\sqrt{(M + Ax)^2 + (Ax\cot\theta - B)^2}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A}{\sin\theta}\right)^2 x^2 + 2A(M - B\cot\theta)x + M^2 + B^2}} \quad (13)$$

因此, 随着频率的变化, 分流比的最大取值决定于投入的滤波器组数, 滤波器等效阻尼电阻与系统电阻的比值, 同时取决于交流系统的阻抗角度。

以 11 次调谐的双调谐滤波器为例, 调谐容量为 96 Mvar, 等效的阻尼电阻为 7.91  $\Omega$ , 滤波器投入组数为 1 组, 通过改变交流系统阻抗角 ( $-60^\circ$ ,  $-80^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $80^\circ$ ) 和交流系统 11 次阻抗 (0.02 p.u., 0.04 p.u., 0.08 p.u.,

0.16 p.u.) 来观察分流比与频率比的变化关系, 如图 4 所示。

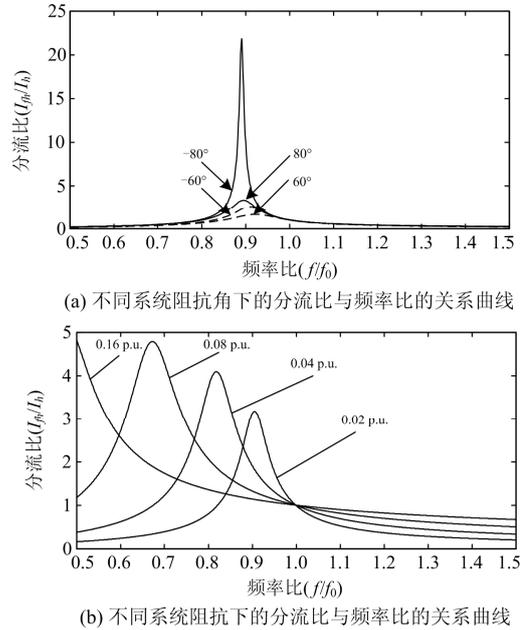


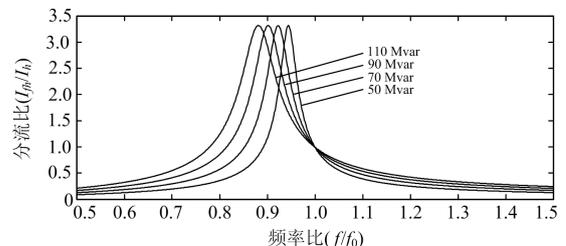
图 4 交流系统条件变化下的分流比与频率比的关系曲线

Fig. 4 Relationships curve of the  $I_{fh}/I_h$  and  $f/f_0$  under different AC system conditions

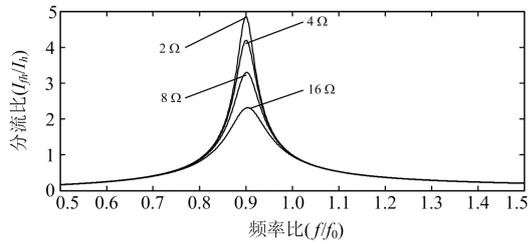
由图 4, 系统阻抗角的变化主要影响最大分流比的数值, 而最大分流比的取值均在频率比为 0.9 附近。系统阻抗值则对最大分流比取值以及对应的频率比均有影响。随着阻抗的增大, 最大分流比增大, 同时频率比降低。

同样以 11 次调谐的双调谐滤波器为例, 交流系统阻抗角取  $80^\circ$ , 11 次阻抗取 0.02 p.u., 调谐容量为 90 Mvar, 等效的阻尼电阻为 8  $\Omega$ , 滤波器投入组数为 1 组, 通过改变调谐容量 (50 Mvar, 70 Mvar, 90 Mvar, 110 Mvar) 和等效阻尼电阻 (2  $\Omega$ , 4  $\Omega$ , 8  $\Omega$ , 16  $\Omega$ ) 来观察分流比最大点及对应的频率比的变化, 如图 5 所示。

由图 5, 系统容量的变化对最大分流比无影响, 但最大分流比对应的频率比会逐渐减小; 等效阻尼电阻的变化不影响最大分流比对应的频率比, 但最大分流比随着电阻的增大逐渐减小。



(a) 不同滤波容量下的分流比与频率比的关系曲线



(b) 不同等效阻尼电阻下的分流比与频率比的关系曲线

图 5 滤波器设计参数变化的分流比与频率比的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves of the  $I_m/I_h$  and  $f/f_0$  under different AC filter parameters

因此，为了适应交流系统频率的大范围变化，应增大滤波容量或增大阻尼电阻。

高压直流输电系统的主要谐波集中在 11 次和 13 次，而滤波器的调谐点也设置在 11 次和 13 次，所以，为简化分析，评估频率变化对交流滤波器定值的影响，可只评估 11 次和 13 次谐波电流的影响。

在较小的频率变化范围内，只需评估对应调谐点次数的谐波电流的影响，如调谐点为 11 次 24 次的双调谐滤波器(DT11/24)，只需评估 11 次谐波电流的影响。但在较大的频率变化范围，如  $\delta=0.85$  时，13 次谐波电流的实际频率会变成 11 次，该电流将流入 DT11/24 中。综上，流入滤波器的总的谐波电流可用式(14)进行近似评估。

$$I = \sqrt{(K_{11}(\delta)I_{11})^2 + (K_{13}(\delta)I_{13})^2} \quad (14)$$

### 3.2 仿真验证

本文以交流滤波器 DT11/24，DT13/36 的滤波器组合为例，研究孤岛频率变化对交流滤波器设备定值的影响。其中 DT 表示双调谐交流滤波器，数字表示滤波器的调谐次数；交流滤波器的基本参数如表 1 所示。本文的仿真结果均基于表 1 的交流滤波器参数，交流系统额定电压为 525 kV，额定频率为 50 Hz。

表 1 交流滤波器配置参数

Table 1 AC filter parameters

滤波器参数	单位	滤波器类型	
		DT11/24	DT13/36
C1	μF	1.839	1.842
L1	mH	15.071	7.295
R1	Ω	500	500
C2	μF	4.789	3.309
L2	mH	11.157	10.587

如表 2 所示，为典型直流输电工程的交流母线谐波电流频谱。

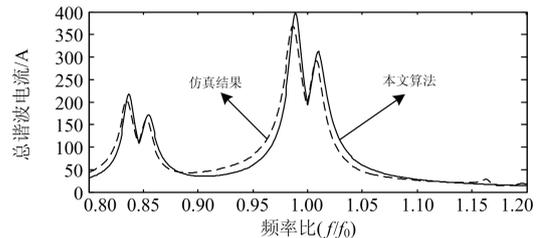
采用 3.1 节提出的近似算法，计算流入滤波器的总谐波电流随着频率比的变化曲线，同时对比了

表 2 典型直流输电工程的交流母线谐波电流频谱

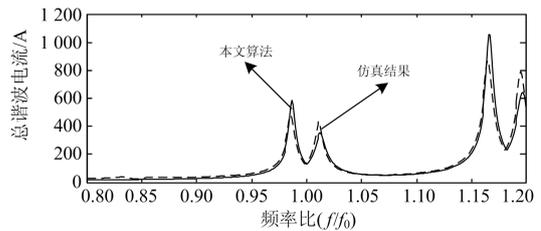
Table 2 Harmonic current spectrum of AC bus in

typical DC project						
谐波电流次数	3	5	7	9	11	13
各次谐波 电流值/A	17.6	10.2	7.4	6.7	231.0	126.4
谐波电流次数	23	25	35	37	47	49
各次谐波 电流值/A	58.2	48.8	19.3	22.0	6.2	8.0

采用交流滤波器经典设计方法得到的总谐波电流与频率比的变化曲线，如图 6 所示。图 6(a)为 DT11/24 滤波器的仿真结果，图 6(b)为 DT13/36 滤波器的仿真结果。本文提出的近似算法与传统算法的误差较小。传统算法中综合考虑了各次谐波电流对滤波器的影响，而本文提出的算法仅考虑了主要的特征次谐波电流的影响，这是误差的主要来源。



(a) DT11/24 滤波器流入总谐波电流与频率比的关系曲线



(b) DT13/36 滤波器流入总谐波电流与频率比的关系曲线

图 6 滤波器流入总谐波电流与频率比的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of the total harmonic current of AC filter and  $f/f_0$

## 4 孤岛运行方式下交流滤波器设备能力评估

直流输电系统孤岛运行是一个特殊工况，但也是直流输电系统的正常运行方式之一，因此必须考虑在此基础上的单极闭锁工况。

根据 3.2 节计算结果，以 DT13/36 为例，当考虑频率变化范围为  $\pm 0.5$  Hz 时，流入滤波器的最大总谐波电流为 400 A，当考虑频率变化最大为 67.5 Hz 时，流入滤波器的最大总谐波电流为 1 055 A，为原滤波器额定值要求的 2.64 倍，若以 1 055 A 最为稳态定值要求，则将增大设备容量的要求。

因孤岛故障条件下的频率变化持续时间较短，

可采用能量计算的方式, 提出短时的设备能量要求, 并根据交流滤波器各元件的过负荷能力, 校核设备能力。

假设孤岛条件下, 基波频率的变化率函数为

$$\delta(t) = \frac{f_0(t)}{f_0} \quad (15)$$

则有

$$x(t) = \delta(t) - \frac{1}{\delta(t)} \quad (16)$$

$$K_N(t) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A}{\sin\theta}\right)^2 x(t)^2 + 2A(M - B \cot\theta)x(t) + M^2 + B^2}} \quad (17)$$

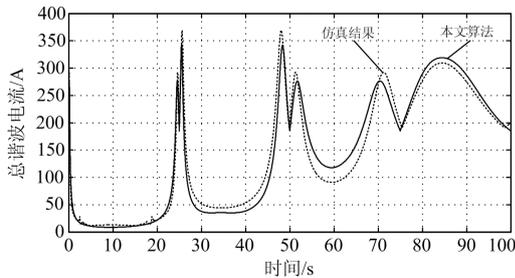
则滤波器上的总谐波电流可近似表达为

$$I = \sqrt{(K_{11}(t)I_{11})^2 + (K_{13}(t)I_{13})^2} \quad (18)$$

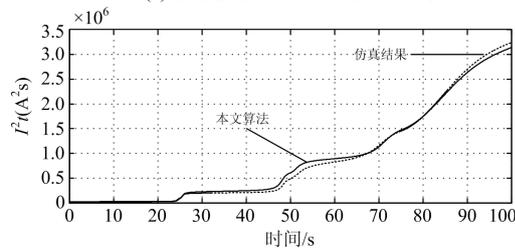
通过上式, 滤波器上的总谐波电流转化为随时间变化的曲线, 考虑谐波电流对设备的影响, 主要表现为能量的影响, 因此可以用  $I^2 t$  曲线来评估其对设备的影响, 如式(19)所示。

$$S = \int_0^t ((K_{11}(t)I_{11})^2 + (K_{13}(t)I_{13})^2) dt \quad (19)$$

采用 4.2 节相同的参数, 孤岛条件下频率变化如图3所示。根据式(18)计算了流入滤波器的总谐波电流, 其随时间的变化关系如图 7(a)所示。流入滤波器的总电流随频率的变化而出现波动, 且变化幅度较大, 本文的简化算法结果与仿真结果基本吻合。



(a) 总谐波电流随时间的变化曲线



(b)  $I^2$  随时间的变化曲线

图 7 孤岛频率变化时谐波电流及能量随时间的变化曲线

Fig. 7 Curve of the total current and energy when the frequency change under isolate operation mode

根据式(19)计算滤波器的能量随时间的变化关系, 如图 7(b)所示。滤波器的能量随时间的变化逐渐增大, 随频率的变化其上升的速度发生改变, 本文的简化算法结果与仿真结果基本吻合。

根据式(19)计算了在孤岛故障后频率变化期间的交流滤波器能量, 则可获得短期内的过负荷倍数要求, 如式(20)所示。

$$K = \frac{S}{\int_0^t I_{\text{rms}}^2 dt} \quad (20)$$

式中,  $I_{\text{rms}}$  为按照传统算法计算的流入交流滤波器总的谐波电流几何和。

根据式(20)中的能量曲线, 即可得到设备在时间  $t$  内的短时过负荷倍数的要求。如图 7(b)所示, 采用不同的算法, 计算 100 s 内的能量要求, 其中额定电流要求为 400 A, 传统算法的电流要求为 1 055 A, 对比结果如表 3 所示。

表 3 不同算法的滤波器过负荷能量要求

Table 3 AC filter energy requirement of different methods			
算法	额定能量要求	孤岛能量要求	过负荷倍数
传统算法	$1.60 \times 10^6$	$11.15 \times 10^6$	6.97
本文算法	$1.60 \times 10^6$	$3.15 \times 10^6$	1.97

若采用传统算法作为过负荷的能量要求, 则其过负荷倍数要求过大, 将导致设备成本的增加, 同时也会增大设备占地。而本文提出的算法可以有效降低过负荷的要求, 降低对孤岛宽频率变化范围的交流滤波器设备定值的要求。

孤岛条件下交流滤波器设计可按照如下方法进行:

1) 首先按照交流系统联网条件, 采用交流滤波器常规设计方法开展初始设计, 并计算滤波器设备额定值。

2) 考虑到孤岛条件下的频率变化, 按照本章提出的交流滤波器设备能力评估方法, 计算交流滤波器的暂态能量要求, 提出交流滤波器各设备对应的过负荷倍数。

3) 以 1)中设备额定值和 2)中过负荷倍数为要求, 编写设备招标规范, 要求设备厂家满足额定值和暂态能量的要求。

## 5 结论

本文提出了采用单调谐特性模拟多调谐滤波器调谐点处频率波动的方法, 分析了在不同的系统条件、不同的滤波器参数下, 频率波动对交流滤波器设备定值的影响, 进而提出了孤岛条件下交流滤波器设备能力的评估方法。主要结论如下:

1) 高压直流输电系统送端孤岛条件下将出现大范围频率变化, 这将导致交流滤波器的失谐, 影响滤波效果, 同时增大滤波器设备定值。

2) 系统阻抗角主要影响最大分流比的数值, 系统阻抗值则对最大分流比取值以及对应的频率比均有影响。随着阻抗的增大, 最大分流比增大, 同时频率比降低。

3) 滤波器容量的变化对最大分流比没有影响, 但最大分流比对应的频率比会逐渐减小; 等效阻尼电阻的变化不影响最大分流比对应的频率比, 但最大分流比随着电阻的增大逐渐减小。

4) 所提出的简化算法与仿真结果基本吻合, 所提出的方法能够有效地校核交流滤波器在孤岛条件下的设备能力, 并可据此提出交流滤波器在孤岛条件下的能量要求。

### 参考文献

- [1] 周保荣, 金小明, 吴小辰, 等. 糯扎渡直流送端普洱换流站孤岛方式谐波阻抗计算研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(5): 24-26.  
ZHOU Baorong, JIN Xiaoming, WU Xiaochen, et al. The research of harmonic impedance computation of isolating operation at Pu'er Converter Station of Nuozhadu HVDC Project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(5): 24-26.
- [2] 胡铭, 蔡汉生, 田杰, 等. 云广直流孤岛运行过电压控制措施研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1905-1909.  
HU Ming, CAI Hansheng, TIAN Jie, et al. Study of overvoltage control schemes for Yun-Guang UHVDC transmission system in island operation[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1905-1909.
- [3] 郭磊, 张英敏, 李兴源. 多通道高压直流广域改进射影控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 29-35.  
GUO Lei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Design of multi-channel wide area modified projective controller for HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 29-35.
- [4] KIRANMAI S A, LAXMI A J. Data mining for classification of power quality problems using WEKA and the effect of attributes on classification accuracy[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 303-314. DOI: 10.1186/s41601-018-0103-3.
- [5] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [6] 苏炜, 马为民. 直流输电换流站交流滤波器稳态额定值研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 63-64.  
SU Wei, MA Weimin. AC filter steady state rating in HVDC converter station[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 63-64.
- [7] 朱光友. 换流站交流侧谐波电流计算与交流滤波器设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.  
ZHU Guangyou. Calculation of AC side harmonic current and design of AC filter at convertor station[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [8] 董希建, 罗剑波, 李雪明, 等. 交直流混联受端电网频率紧急协调控制技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 59-66.  
DONG Xijian, LUO Jianbo, LI Xueming, et al. Research and application of frequency emergency coordination and control technology in hybrid AC/DC power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 59-66.
- [9] 蔡东晓, 李海锋, 祝新驰, 等. 送出直流对工频变化量元件的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 1-9.  
CAI Dongxiao, LI Haifeng, ZHU Xinchu, et al. Mechanism analysis of the impact of DC system on power-frequency variation protections[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 1-9.
- [10] 同向前, 薛均义. 电力调谐滤波器的最佳偏调谐设计[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.
- [11] 薛英林, 徐政, 李普明, 等. 高压直流输电双调谐滤波器阻尼电阻的选取原则[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13): 92-97.  
XUE Yinglin, XU Zheng, LI Puming, et al. Selection principle of damping resistor for double-tuned filter in HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13): 92-97.
- [12] 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 project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2): 67-71.
- [13] 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.

- [14] DAS J C. Passive filters-potentialities and limitations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1): 232-241.
- [15] 周国伟, 顾用地, 周建平, 等. 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 122-128.  
ZHOU Guowei, GU Yongdi, ZHOU Jianping, et al. Analysis of non-characteristic harmonic in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 122-128.
- [16] 李普明, 徐政, 黄莹, 等. 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, 2008, 28(16): 115-121.  
LI Puming, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Algorithm for the parameters of AC filters in HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 115-121.
- [17] 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): 1-7.  
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): 1-7.
- [18] XUE Y, ZHANG X P, YANG C. Series capacitor compensated AC filterless flexible LCC HVDC with enhanced power transfer under unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3069-3080.
- [19] LI Xin, WANG Yang, XU Wilsun, et al. A new filtering scheme for HVDC terminals based on damped high pass filter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 40(1): 232-241.
- [20] 黄银龙, 赵胜男, 罗光辉, 等. 基于谐波阻抗的单调谐滤波器在线监测及失谐辨识[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 24-28.  
HUANG Yinlong, ZHAO Shengnan, LUO Guanghui, et al. Online monitoring and detuning identification for single-tuned filter based on harmonic impedance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 24-28.
- [21] 余荣兴, 刘茂涛. 云广特高压孤岛运行方式下单极闭锁性能试验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 146-149.  
YU Rongxing, LIU Maotao. Monopole ESOF test of Yun-Guang UHVDC under islanded operation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 146-149.
- [22] 陈亦平, 陈磊, 叶骏, 等. 云广直流孤岛运行“5·26”双极闭锁原因分析及改进措施[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(8): 129-135.  
CHEN Yiping, CHEN Lei, YE Jun, et al. Analysis and improvement of “5.26” bipole trip of Yunnan-Guangdong HVDC islanded operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 129-135.
- [23] ZHANG M, YUAN X, HU J, et al. Wind power transmission through LCC-HVDC with wind turbine inertial and primary frequency supports[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA.
- [24] 肖湘宁, 李伟, 罗超, 等. 特高压直流孤岛运行特性与稳定控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 1-7.  
XIAO Xiangning, LI Wei, LUO Chao, et al. Survey on operational characteristics and stability control of ultra-HVDC transmission system in islanded mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 1-7.
- [25] KIM E H, KIM S H, OH S B, et al. Modeling and analysis of power system operation connected with wind turbine generation system and HVDC in Jeju island using PSCAD/EMTDC[C] // 2007 7th International Conference on Power Electronics, October 22-26, 2007, Daegu, South Korea.
- [26] 郝梦竹, 王青, 李文启, 等. 不同直流闭锁故障对弱交流联络线功率波动影响机制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 88-94.  
HAO Mengzhu, WANG Qing, LI Wenqi, et al. Power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 88-94.

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-10-24

作者简介:

辛清明(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为直流输电技术; E-mail: xinqm@csg.cn

赵晓斌(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为直流输电技术; E-mail: zhaoxb@csg.cn

黄莹(1977—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为直流输电技术。E-mail: huangying@csg.cn

(编辑 张爱琴)