

同塔双回高压直流工程交流滤波器设计

薛英林¹, 李普明¹, 徐 政¹, 黄 莹², 黎小林²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510623)

摘要: 同塔双回高压直流(DCT-HVDC)工程在世界上尚未见到设计和实际运行的经验,而以往的交流谐波计算和滤波器设计算法,只适用于传统单回直流工程,无法满足双回共站直流工程的设计要求。文中对双回共站直流工程设计存在的技术难点进行了分析,提出了改进算法和解决方案。首先,根据直流输电系统的特点,假设直流输电线路入口处的谐波电压为 0,使整流侧和逆变侧的谐波电流计算相互解耦,避免了计算过程中对直流线路的建模,这样,DCT-HVDC 工程可以等效为 2 个常规的单回直流工程分别加以考虑;然后,将 2 个单回直流工程运行工况合成为一个新的双回运行工况,在该运行方式下,取各种功率组合的各次最大不相容电流作为滤波器性能定值校核的谐波电流源,从而消除了不同功率组合方式对谐波电流的影响且大大减少了计算量;接着,研究了 DCT-HVDC 工程滤波器投切策略的确定方法和基本原则;最后,以溪洛渡送电广东±500 kV DCT-HVDC 工程为例,通过工程初步设计和计算,验证了所提出的改进模型的合理性和工程应用价值。

关键词: 高压直流(HVDC); 同塔双回(DCT); 谐波计算; 滤波器设计; 投切策略

0 引言

高压直流(HVDC)工程采用同塔双回(DCT)线路或同塔多回线路,具有提高单位走廊的输送容量、高效利用现有走廊资源、提高通道利用率、节约土地资源和增强跨区资源的优化配置能力等多种优点^[1-2],并且能够产生巨大的经济和社会效益,具有广阔的发展前景。正在规划和设计中的溪洛渡右岸双回 HVDC 输电系统采用同塔并架输电方式,双回直流系统的额定电压为±500 kV,额定功率为 3 200 MW;双回直流输电系统处于同一个换流站,有各自独立的直流场;双回直流系统可独立控制,也可统一协调控制;双回±500 kV 直流系统共用一个交流场^[3-4]。由于调度和协调灵活多样,双回直流系统的运行方式和功率水平都可能不同,而交流滤波器设计则需要满足两回直流任意运行工况和功率水平组合方式下的无功补偿和滤波要求,这就对双回直流共站的交流滤波器设计提出了更高的要求。

以往的交流谐波计算和交流滤波器设计算法只是针对传统单回直流系统的特点提出的,无法满足溪洛渡工程的要求,这就需要对原有算法进行优化改进,在工程精度允许的范围内作适当简化,以提高计算速度,满足工程要求。

本文就 DCT-HVDC 工程设计存在的技术难点进行分析,并根据直流工程特点提出相应的解决方案和改进措施。

1 谐波电流计算存在的技术难点

实际直流输电工程的主要设备包括换流阀、换流变压器、交流滤波器、平波电抗器、直流滤波器以及直流线路等。图 1 为 DCT-HVDC 输电系统结构示意图,采用 12 脉动单阀组方式,共用一个交流场。

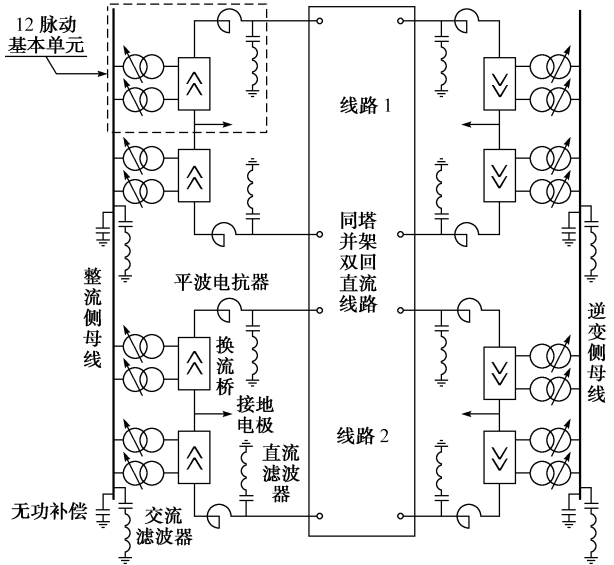


图 1 DCT-HVDC 输电系统结构
Fig. 1 Structure of DCT-HVDC transmission system

传统单回谐波电流计算^[5-6]采用计及直流线路的交直流耦合模型,根据在不同工况和运行方式下计算出来的主回路稳态参数^[7],从最小容许输送功率开始,直到最大稳态过负荷功率,以额定功率的一定百分比(通常为5%)为步长,逐步增加输送功率,逐一计算每个负载水平下的谐波电流。

但是,对于 DCT-HVDC 工程而言,功率协调控制方式面临二维选择的问题,即在总输送功率一定的前提下,双回线路的功率组合方式多种多样。双回线路在不同的功率分配方式下,直流侧电流 I_d 不同,将导致换相角 μ 不同,进而影响交流侧谐波。此外,从图 1 可以看出,由于将直流线路等效为多端口模型,整流侧与逆变侧之间和同塔并架的双回线路之间出现耦合关系,从而直接影响到直流侧纹波。因此,计及直流网络将会使整流侧与逆变侧之间、双回线路之间产生耦合而使问题变得异常复杂。如果遍历所有可能的工况组合和功率分配方式,计算速度将远远不能满足滤波器设计的要求,因此必须对现有模型进行优化和改进,在满足精度的前提下合理模拟和计算不同功率输送方式,提高谐波算法的计算速度,以满足双回直流共站工程的需要。

2 谐波电流计算的改进模型

2.1 直流侧模型的改进

由以上分析可知,影响交流谐波电流计算速度的关键之一是直流侧模型的建立。事实上,经过平波电抗器和完善的直流滤波系统后,换流站出口处的极线与中性母线之间的谐波电压很小,一般直流工程 50 次内总谐波电压均方根值与直流电压相比在 0.5% 以内,所以其可以忽略不计。这样,对于谐波分量而言,可以认为两者之间是短路的,则 12 脉动基本换流单元可简化为图 2 所示形式。

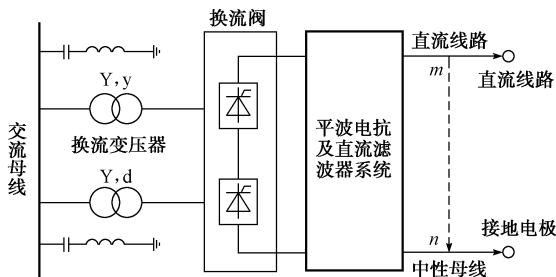


图 2 12 脉动基本换流单元

Fig. 2 Basic computational unit of 12-pulse converter

在求解直流侧纹波时,分析直流侧网络结构,根据平波电抗器的具体布置方案,可以得到平波电抗及直流滤波器系统的入端阻抗 $Z_{s(n)}$,换流器可以等效为内阻抗为 $Z_{c(n)}$ 的谐波电压源,因此,求解直流

侧纹波电流模型如图 3 所示。在频域上求解直流侧纹波,分别计算各次谐波电压引起的谐波电流,在每一次谐波频率下,采用节点导纳分析法,求解换流站出口处各次纹波电流 $\hat{i}_{d(n)}$,然后在时域中根据换相期间和非换相期间的等值电路求解出交流系统阀侧电流,之后折算到交流系统侧进行傅里叶级数展开即可得到各次谐波电流。

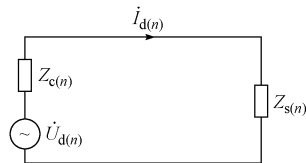


图 3 直流侧谐波分量戴维南等效电路

Fig. 3 Thevenin equivalent circuit of harmonic component for DC side

2.2 合成双回谐波电流结果

采用上述改进模型消除了直流线路耦合的作用,从而实现了整流侧与逆变侧之间以及双回线路之间谐波电流计算的相互解耦,避免了计算过程中对直流线路的建模和功率分配对不同回线路的影响,所以,共站的双回直流工程可以等效为 2 个传统单回直流工程分别计算,即分功率逐步计算各个负荷水平下的谐波电流,最后,将双回不同运行工况合成为一个新的运行方式,在该运行方式下取各种负荷分配组合的最大不相容电流,作为接下来滤波器性能定值校核的谐波电流源,即有:

$$I_{P_{total}(n)} = \max_{P_{total}=P_1+P_2} \{ I_{P_1(n)} + I_{P_2(n)} \} \quad (1)$$

式中: P_{total} 为总输送功率; P_1 为线路 1 的输送功率; P_2 为线路 2 的输送功率; n 为谐波次数。

值得指出的是,这样得到的谐波电流源虽然偏于保守,但是设计出来的滤波器能满足不同功率组合方式下各次谐波的要求,而且大大减小了工作量,提高了计算速度。

3 滤波器设计

3.1 滤波器基本类型和参数整定

工程中常见的滤波器类型^[8-11]主要有单调谐滤波器、双调谐滤波器、三调谐滤波器和 C 型阻尼滤波器,通用结构如附录 A 图 A1 所示。

单调谐滤波器和 C 型阻尼滤波器结构简单,可以很好地进行分析和计算。而多调谐滤波器结构复杂,工程上通常采用如下等效算法^[12]:首先忽略电阻的影响,将滤波器化简为无阻尼的 LC 电路,然后将多调谐滤波器等效为多个单调谐滤波器,根据经验给出各个单调谐滤波器的输出无功功率,通过所要抑制的谐波次数和所连接交流母线的基波电压计

算单调谐波滤波器的电容和电感,最后经阻抗等效确定原来滤波器的电容和电感。性能计算可能要不断重复以上过程,如果某次谐波超标,则增大滤除对应次谐波的等效无功功率以进行调整和优化。

并联阻尼电阻的选取,通常也需要采用试算的方式确定,即在确定电路结构及参数后,根据工程经验给出电阻值,计算滤波器的性能和各个元件的应力定值,如不能满足要求,则需要调整电阻的大小并重新验算,直到满足性能和定值指标要求为止。

3.2 滤波器投切策略设计

滤波器投切策略包括在某个运行方式的各个负荷水平下需要投切几组滤波器和选用哪些滤波器组合方式。投切策略的制定直接影响最终性能和定值结果。

3.2.1 滤波器投切组数的确定

不同运行方式下,高压直流换流器消耗的无功功率不同。根据换流原理可知,DCT-HVDC 工程中,每回线路对应的换流器消耗的无功功率为^[13]:

$$Q_{di} = P_{di} \tan \varphi_i \quad (2)$$

式中:

$$\tan \varphi = \frac{\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)}$$

i 为线路编号; P_{di} 为线路 i 输送的直流功率; α 为触发角; μ 为换相角。

交流滤波器能够补偿无功功率的消耗,同时还能滤除由高压直流换流器产生的谐波。实际运行中,交流滤波器的投入是由无功补偿和无功平衡控制决定的,对于特定的运行工况而言,其投入数目与直流系统消耗的无功功率、交流系统所能提供的最大无功功率和交流系统所能吸收的最大无功功率以及运行电压密切相关,满足:

$$\sum Q_{f,\min} \leq Q_{f,\text{total}} \leq \sum Q_{f,\max} \quad (3)$$

$$\sum Q_{f,\min} = Q_{d1} \left(\frac{U_f}{U_{AC}} \right)^2 + Q_{d2} \left(\frac{U_f}{U_{AC}} \right)^2 - Q_{AC-DC} \left(\frac{U_f}{U_{AC}} \right)^2 \quad (4)$$

$$\sum Q_{f,\max} = Q_{d1} \left(\frac{U_f}{U_{AC}} \right)^2 + Q_{d2} \left(\frac{U_f}{U_{AC}} \right)^2 + Q_{DC-AC} \left(\frac{U_f}{U_{AC}} \right)^2 \quad (5)$$

式中: $\sum Q_{f,\max}$ 和 $\sum Q_{f,\min}$ 分别为交流系统允许滤波器发出的最大、最小无功功率; $Q_{f,\text{total}}$ 为投入运行的滤波器所提供的无功容量; U_f 为滤波器的额定电压; U_{AC} 为交流系统运行电压; Q_{DC-AC} 为交流系统吸收的最大无功功率; Q_{AC-DC} 为交流系统发出的最大无功功率; Q_{d1} 为线路 1 对应的换流器消耗的无功功率; Q_{d2} 为线路 2 对应的换流器消耗的无功功率。

一个设计合理的无功补偿和交流滤波器系统应具备如下特点^[14]:①由于无功补偿的要求,所需要

投入的交流滤波器数应大于由于滤波性能的要求所必须投入的交流滤波器数;②由于滤波器稳态额定值的要求,所需要投入的交流滤波器数应最少。通常在工程计算中,性能计算时投入滤波器数采用最大无功校核,而定值计算时采用最小无功校核,即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k N_i Q_{fi} < Q_{f,\max} \\ \sum_{i=1}^k N_i Q_{fi} + \frac{Q_{fi}}{\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}} \geq Q_{f,\max} \\ N_{\text{prf}} = \sum_{i=1}^k N_i \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^k N_i Q_{fi} \geq Q_{f,\min} \\ \sum_{i=1}^k N_i Q_{fi} - \frac{Q_{fi}}{\forall i \in \{1, 2, \dots, k\}} < Q_{f,\min} \\ N_{\text{rat}} = \sum_{i=1}^k N_i \end{cases} \quad (7)$$

式中: N_i 为第 i 种类型滤波器的投入数量; k 为滤波器种类数; Q_{fi} 为第 i 种类型滤波器在该工况运行电压水平下的无功容量; N_{prf} 为性能计算中投入滤波器数; N_{rat} 为定值计算中投入滤波器数。

如果每种滤波器的无功容量都相同,则式(6)和式(7)可以分别简化为:

$$N_{\text{prf}} = \left\lfloor \frac{\sum Q_{f,\max}}{Q_f} \right\rfloor \quad (8)$$

$$N_{\text{rat}} = \left\lceil \frac{\sum Q_{f,\min}}{Q_f} \right\rceil \quad (9)$$

3.2.2 滤波器投切组合的选取

在滤波器结构参数和特定输送水平下的投入组数确定后,影响交流滤波器阻抗的最大因素就是其组合形式。如果组合形式选取得过于恶劣,则可能导致某些性能指标超标或元件稳态定值过大,或者引起现场投切和调试的困难。

如图 4 所示,假设在某一负荷水平下需要投入 5 个滤波器,则有以下 4 种组合:4A+1B,3A+2B,2A+3B,1A+4B(A 为 DT11/24,B 为 DT13/26,下文同)。由图 4 可以看出,随着组合形式的变化,阻抗频率的变化较大,其中,4A+1B 和 1A+4B 由于阻抗频率恶劣,即滤除特征谐波(11 次或 13 次)的等效容量偏小,可能导致某些运行工况性能超标,因此,工程中通常选取 3A+2B 和 2A+3B。

在制定滤波器投切策略时,根据以往的工程经验,有些基本原则需要遵循:

1) 首先投入滤除特征谐波的滤波器,最小负荷水平下尽量少投入高通滤波器;不同类型的特征谐波,滤波器投入数目应该尽量平衡。

2)并联电容器通常在滤波器已经全部投入(考虑一组备用)后再投入运行,以主要起到无功补偿的作用并兼顾滤除高次谐波。

3)性能计算时,应考虑任一小组滤波器退出运行的情况。

4)定值计算时,从最小负荷水平到额定负荷水平,应考虑任一大组滤波器退出运行的情况;在双极运行工况下,从最小负荷水平到50%负荷水平,应考虑任两小组滤波器退出运行的情况。

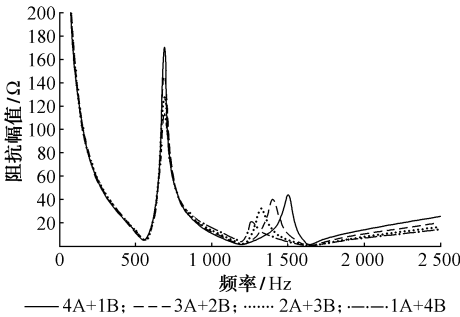


图 4 不同滤波器组合下的阻抗频率特性
Fig. 4 Impedance-frequency characteristic of different combinations of filters

3.3 滤波器设计的基本流程

在制定好滤波器投切策略后,对各种运行工况的不同负荷水平下的滤波器组合都要进行性能定值计算^[15],校核所配置的方案是否满足性能指标要求和定值限制,如果不满足要求则要不断调整和优化配置方案,直到满足相关指标要求为止。其基本流程如图 5 所示。

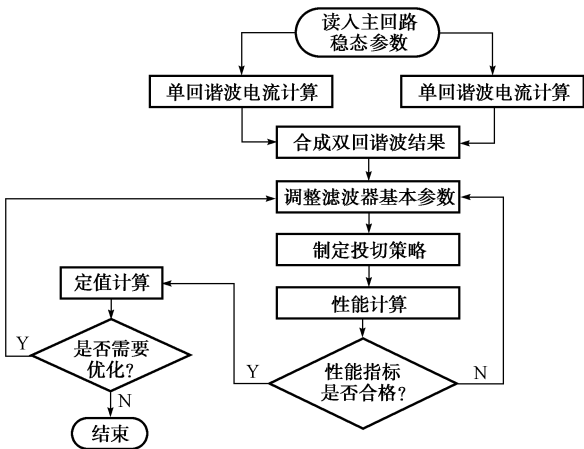


图 5 滤波器设计的基本流程
Fig. 5 Basic process of filter design

4 工程初步设计

以溪洛渡工程初步设计为例,首先利用改进的谐波电流算法得到各种运行工况下的最大不相容谐

波组合,然后对滤波器参数进行初步设计和调整,根据式(3)~式(7)制定相应的滤波器投切策略,重复上述过程进行反复设计和优化,最终确定配置方案为 4A+4B+14SC(SC 表示静止电容器),其中,不同类型滤波器容量一致。交流滤波器性能计算结果如表 1 所示,表明该配置方案可以满足系统要求。

表 1 性能计算结果
Table 1 Performance calculation results

性能指标	性能指标要求/(%)	校核结果/(%)
3 次谐波电压畸变率	1.0	0.491
5 次谐波电压畸变率	1.0	0.829
奇次谐波电压畸变率	0.8	0.731
偶次谐波电压畸变率	0.5	0.435
总谐波电压畸变率	1.5	1.045
电压谐波波形系数	1.0	0.962

5 结语

本文针对 DCT-HVDC 输电系统的特点,对原有谐波电流计算算法和滤波器设计进行了改进,给出了交流滤波器设计的基本流程,经过工程的初步设计和计算,验证了该算法的合理性和有效性。值得指出的是,在交流滤波器参数整定计算过程中,部分参数的选取很大程度上依赖于设计者的工程经验,例如滤波器的等效调谐容量分配、阻尼电阻的选取等,因此进一步深入研究参数的选取对滤波器性能定值影响的基本规律,对于提高滤波器设计效率具有重要意义。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 石岩,王庆,聂定珍,等. ±500 kV 直流输电工程同杆并架技术的综合研究. 电网技术, 2006, 30(21): 1-6.
SHI Yan, WANG Qing, NIE Dingzhen, et al. Comprehensive study on technology of two bipole lines on the same tower for ±500 kV HVDC project. Power System Technology, 2006, 30(21): 1-6.

[2] 张民,石岩. 同杆并架±500 kV 直流系统间相互影响的实时仿真分析. 电网技术, 2007, 31(1): 44-49.
ZHANG Min, SHI Yan. Real-time digital simulation analysis on interaction between two ±500 kV HVDC systems erected on the same tower. Power System Technology, 2007, 31(1): 44-49.

[3] 戴国安,李岩,李少华,等. 同塔双回直流系统无功功率控制策略研究//中国电机工程学会继电保护专业委员会第十二届全国保护和学术研讨会论文集, 2009 年 11 月 20-22 日,长沙: 299-302.

[4] 李少华,苏匀,张爱玲,等. 溪洛渡送电广东±500 kV 同塔双回直流输电工程 PSCAD/EMTDC 建模仿真//中国电机工程学会继电保护专业委员会第十二届全国保护和学术研讨会论文

- 集, 2009年11月20-22日, 长沙: 295-298.
- [5] 朱光友, 徐政, 黄莹, 等. 换流站特征谐波电流时域分段快速算法. 高电压技术, 2008, 34(2): 251-255.
ZHU Guangyou, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Fast calculation of converter characteristic harmonic currents with time domain piecewise method. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 251-255.
- [6] 黄莹, 黎小林, 朱光友, 等. 换流站非特征谐波电流时域分段蒙特卡洛算法. 高压电器, 2007, 43(5): 325-328.
HUANG Ying, LI Xiaolin, ZHU Guangyou, et al. Calculation of converter non-characteristic harmonic currents based on time domain piecewise and Monte Carlo. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 325-328.
- [7] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [8] 赵贺, 林海雪. 单调谐滤波器电容器参数选择的工程方法. 电网技术, 2006, 30(20): 52-55.
ZHAO He, LIN Haixue. Engineering method to select parameters of single-tuned filter capacitor. Power System Technology, 2006, 30(20): 52-55.
- [9] 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. 电网技术, 1999, 23(8): 31-34.
WU Guopei, REN Zhen, TANG Zhuoyao. Characteristic analysis of double-tuned filter in HVDC system. Power System Technology, 1999, 23(8): 31-34.
- [10] 肖遥. 三调谐滤波器的参数计算方法. 南方电网技术研究, 2005, 1(3): 43-46.
XIAO Yao. Algorithm for parameters of triple tuned filter. China Southern Power Grid Technology Research, 2005, 1(3): 43-46.
- [11] 任震, 曾艳, 戴保明. 高压直流输电系统C型阻尼滤波器的优化模型及其算法. 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. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 123-126.
- [12] 李普明, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电交流滤波器参数的计算. 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. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 115-121.
- [13] 王峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电无功管理的原则与算法. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 85-88.
WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Principle and algorithms of reactive power management for HVDC transmission. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 85-88.
- [14] 赵婉君. 高压直流输电工程技术. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [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. 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. Southern Power System Technology, 2010, 4(2): 67-71.

薛英林(1986—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 直流输电. E-mail: yinglinxue@gmail.com

李普明(1984—), 男, 硕士, 主要研究方向: 直流输电和滤波器设计.

徐政(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量.

Design of Alternating Current Filter for Double Circuit High Voltage Direct Current Transmission Project

XUE Yinglin¹, LI Puming¹, XU Zheng¹, HUANG Ying², LI Xiaolin²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China Southern Power Grid Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: About double circuit transmission high voltage direct current (DCT-HVDC) project, there is no actual operation and design experience in the world. The previous alternating current side harmonic calculation and filter design methods are only suitable for the traditional single circuit HVDC project, and can not be used for the harmonic calculation and filter design of the DCT-HVDC project. In this paper, the technical difficulties of DCT-HVDC are analyzed, and some solutions are proposed. First, based on the characteristics of the HVDC system, the harmonic voltages on the entrance of the DC line are assumed to be zero. It decouples the harmonic current calculation process of the rectifier side and inverter side, and avoids the modeling of the DC line in the harmonic current calculation. The DCT-HVDC project can thus be reduced as two traditional single circuit HVDC projects. Second, two operation modes of the single circuit HVDC projects are synthesized as a new DCT-HVDC operation mode. In this mode, the maximal harmonic combination is picked up among different power combinations as the harmonic current sources for the performance and rating calculation, which eliminates the adverse effect of different power combinations on harmonic calculation and greatly reduces the computation burden. Third, the algorithm and basic principle of filter switching strategy are studied. At last, the validity of the proposed method is demonstrated by the engineering calculation and preliminary design of the Xiluodu-Guangdong ±500 kV DCT-HVDC project.

This work is supported by Mega-projects of Science Research for the 11th Five-year Plan (No. 2006BAA02A21).

Key words: high voltage direct current (HVDC); double circuit transmission (DCT); harmonic calculation; filter design; switching strategy

附录 A 工程中常见的 4 种滤波器类型

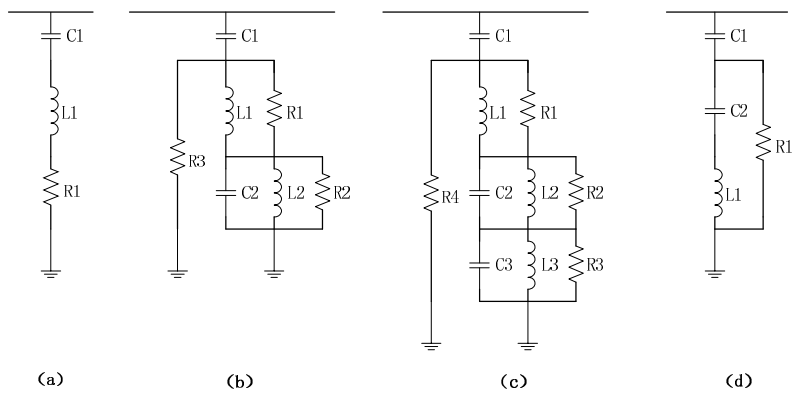


图 A1 4 种滤波器通用结构
Fig.A1 General structure of four kinds of filters