

受端混联型 LCC-VSC 直流侧谐波计算方法研究

叶键民¹, 王若愚¹, 罗红梅², 谢岩²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:受端混联型 LCC-VSC 混合直流输电技术不仅具备 LCC 和 VSC 的优势, 而且在受端采用高压阀组 LCC 与低压阀组三端并联 VSC 相串联的结构, 传输容量更大, 制造难度低, 造价低, 是新型电力系统的重要组成部分, 具有广阔的应用前景。然而, 直流侧谐波特性对整个受端混联型 LCC-VSC 系统的控制保护有比较大的影响, 目前很少有文献对该系统直流侧谐波特性展开研究和讨论。因此, 分别建立 LCC、直流滤波器和 VSC 谐波等效模型, 根据受端混联型 LCC-VSC 拓扑结构提出其直流侧谐波计算等效模型, 计算误差不超过 10%。最后, 利用某混合直流输电实例验证所提直流侧谐波计算方法的有效性和准确性。

关键词:基于电网换相换流器高压直流输电; 柔性直流输电; 受端混联型 LCC-VSC; 直流滤波器; 直流侧谐波

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23967

Study on Harmonic Calculation Method of DC Side of Receiving End Hybrid LCC-VSC

YE Jianmin¹, WANG Ruoyu¹, LUO Hongmei², XIE Yan²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The receiving end hybrid line commutated converter based voltage source converter (LCC-VSC) not only has the advantages of LCC and VSC, but also adopts the structure of high-voltage valve group LCC and low-voltage valve group three-end parallel VSC in series at the receiving end. Therefore, the receiving end hybrid LCC-VSC has greater transmission capacity, low manufacturing difficulty and low cost. With these advantages, it is a very promising technology of the future power system and has great application prospects. However, the DC side harmonic characteristics have a great impact on the control and protection strategy of the whole receiving end hybrid LCC-VSC system. Unfortunately, this problem is not studied fully. Therefore, the harmonic equivalent models of LCC, DC filter and VSC were established. Moreover, the DC side harmonic calculation equivalent model was proposed on basis of the receiving end hybrid LCC-VSC topology and the harmonic equivalent models. Theoretical analysis and simulations of a receiving end hybrid LCC-VSC project shows that the calculation error of the proposed model is no more than 10%.

Key words: line commutated converter based high voltage direct current (LCC-HVDC); HVDC flexible; receiving end hybrid LCC-VSC; DC filter; DC side harmonic

相比于交流输电, 直流输电方式具有线路造价低、输送容量大、可以实现不同频率电网之间的联网、无同步稳定性问题等优势, 在几十年间得到了长足的发展^[1-2]。目前在实际工程中使用的高压直流输电技术主要包括两种: 基于电网换相换流器的高压直流 (line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)^[3-4] 输电技术和以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流 (voltage source converter based high

voltage direct current, VSC-HVDC)^[5-7] 输电技术。

LCC-HVDC 具有结构简单、造价低、技术成熟、可靠性高以及适合远距离大容量电能传输等诸多优势^[8]。但 LCC 换流站在工作时需要吸收大量无功功率, 且交直流侧均含有大量谐波, 需要额外的无功补偿以及交直流滤波装置, 增大了建设成本。文献[9]采用基于开关函数的谐波计算模型对 LCC-HVDC 特征谐波进行分析, 指出 LCC-HVDC 直流侧谐波分量以 12, 24, 36, 48 次直流电

作者简介: 叶键民 (1989—), 男, 硕士, 工程师, Email: yejianmin021x@sz.csg.cn

通讯作者: 罗红梅 (1977—), 女, 硕士, 高级工程师, Email: luohm@epri.sgcc.com.cn

压特征谐波分量为主。同时,LCC-HVDC受自身技术限制,在逆变侧存在换相失败问题,无法向弱交流系统/无源网络供电^[10-11]。相比之下,VSC-HVDC采用全控型电力电子器件IGBT,再结合电压调制技术,能够独立调节有功功率与无功功率,谐波水平低,可以向无源网络供电,不存在换相失败问题,并且占地面积小,有助于清洁能源接入网络^[12-13]。

综合来看,LCC-HVDC和VSC-HVDC都有各自的优势和不足,为了能充分发挥两种直流输电方式的优势,在同一直流系统中使用这两种不同类型的换流器,称之为混合直流输电技术^[14-15]。混合直流输电系统有多种不同的拓扑结构,如整流侧LCC逆变侧VSC结构、整流侧LCC逆变侧LCC和VSC串联结构、1条LCC-HVDC和1条VSC-HVDC混合连接结构等^[16-17]。国家电网公司规划的白鹤滩—苏南的混合直流输电工程也是混合直流输电方式的一种,它是一种受端混联型直流输电系统,即直流输电系统的整流侧采用LCC,而逆变侧则采用高压阀组LCC与低压阀组三端并联VSC相串联的结构。采用这种结构的优势有:相较于LCC结构,逆变端低压阀组的VSC可以在一定程度上降低系统在逆变侧发生换相失败的几率,显著减少了线路上的无功传输以及功率损耗,减少了无功补偿装置和滤波环节的投入,提高了经济性,并且在主直流线路故障时高压阀组LCC可以起到故障隔离的作用。相较于VSC结构,混联结构的传输容量更大,制造难度低,造价低。除此之外,受端采用多端口并联的形式可以让电能的传输与出口的设置根据实际需要进行调整,使直流系统变得更加灵活^[18-19]。

这种新型拓扑结构的直流侧谐波特性对整个受端混联型LCC-VSC系统的控制保护有比较大的影响^[20],目前很少有文献对该系统直流侧谐波特性展开研究和讨论。针对这个问题,本文首先研究LCC-HVDC直流侧不同频次谐波电流通路及其等效模型,其次研究VSC直流侧谐波等效模型,然后提出受端混联型LCC-VSC系统直流侧谐波的定量计算方法,最后利用实例模型验证所提方法的正确性和有效性。

1 LCC-HVDC直流谐波等效模型

混联型LCC-VSC系统中,LCC以12脉动换流

器为输电单元。12脉动LCC换流器输出直流电压主要包含 $12k$ 次谐波分量(k 为整数,一般小于10)。然而在实际运行直流输电工程的接地极电流中检测到了较高的 $6k+3$ 次谐波分量,经分析发现,换流变压器与地之间的杂散电容导致了接地电流支路的产生,而该支路在极线与接地线的谐波电流分布中起了相当重要的作用。从而,在现有的直流侧谐波分析方法中,一般将12脉动LCC换流器用3脉动谐波电压源等值,如图1所示。

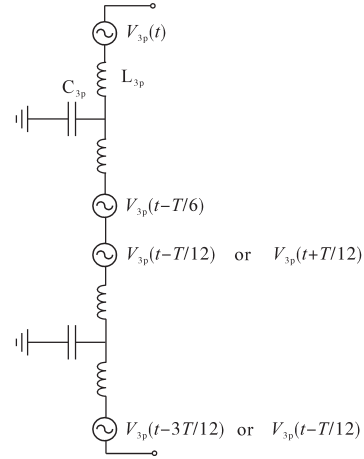


图1 12脉动LCC换流器的3脉动谐波电压源等值电路

Fig.1 Equivalent circuit of 3-pulse harmonic voltage source for 12-pulse LCC converter

图1中,12脉动LCC是由4个3脉动谐波电压源串联组成,每个3脉动谐波电压源相位相差 $\pi/6$ 。以3脉动谐波电压源及其参数为基本单元, C_{3p} 为耦合于变压器绕组和地之间的杂散电容,其典型取值为10~20 nF, L_{3p} 为串联在谐波电压源的等值电感。由于常见的LCC换流器为6脉动换流器,每隔 $\pi/3$ 电角度发生一次换相,且换相过程中的换相电感为换流变压器漏感的1.5倍(不换相时为换流变压器漏感的2倍),所以用6脉动换流器参数来计算 L_{3p} 。3脉动谐波电压源等值电感 L_{3p} 是6脉动LCC换相电感平均值的1/2,可以表示为

$$L_{3p} = \frac{1}{2} \left[1.5 \frac{3\mu}{\pi} + 2 \left(1 - \frac{3\mu}{\pi} \right) \right] L_T \quad (1)$$

式中: μ 为换相重叠角,rad; L_T 为换流变压器漏感。

假定12脉动LCC输电单元中星/星形接线方式的变压器二次侧电压为

$$\begin{cases} u_{ca} = U_c \cos(\omega t + \varphi_0) \\ u_{cb} = U_c \cos(\omega t + \varphi_0 - \frac{2}{3}\pi) \\ u_{cc} = U_c \cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_c 为相电压幅值; φ_0 为 a 相电压的初相角; ω

为角频率。

由6脉动LCC两极直流母线的输出电压波形经傅里叶级数展开可得到3脉动谐波电压源 $V_{3p}(t)$ 和 $V_{3p}(t-T/6)$ (6脉动LCC负极直流母线输出电压的傅里叶级数展开形式的相反数),其中 $V_{3p}(t)$ 可以表示为

$$V_{3p}(t) = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} U_c \{ \cos\alpha + \cos(\alpha + \mu) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k [a_{3k} \cos(3k\omega t) + b_{3k} \sin(3k\omega t)] \} \quad (3)$$

其中

$$a_{3k} = \frac{\cos[(3k+1)\alpha - 3k\varphi_0] + \cos[(3k+1)(\alpha + \mu) - 3k\varphi_0]}{3k+1} - \frac{\cos[(3k-1)\alpha + 3k\varphi_0] + \cos[(3k-1)(\alpha + \mu) + 3k\varphi_0]}{3k-1}$$

$$b_{3k} = \frac{\sin[(3k+1)\alpha - 3k\varphi_0] + \sin[(3k+1)(\alpha + \mu) - 3k\varphi_0]}{3k+1} - \frac{\sin[(3k-1)\alpha + 3k\varphi_0] + \sin[(3k-1)(\alpha + \mu) + 3k\varphi_0]}{3k-1}$$

式中: α 为触发角。

应该注意到两个等效电压源相位相差 60° ,这是因为LCC在正常运行时的相邻两次晶闸管换相过程分别发生在上桥臂和下桥臂,且相位间隔为 $\omega t = \pi/3$ 。

由12脉动LCC换流器的3脉动谐波电压源等值模型可分析各种频次谐波电压、电流的分布有如下特征:12脉动LCC直流侧输出的 $12k$ 次谐波电压和电流将经直流系统结构传递到VSC侧,也就是说VSC直流侧电压、电流谐波主要为 $12k$ 次,而电压、电流谐波的进一步定量分析工作还需考虑混联型LCC-VSC系统直流侧其它部分(LCC的直流滤波器、VSC换流器、直流线路等)的等值电路。

2 LCC-HVDC 直流滤波器数学模型

由第1节分析可知,12脉动LCC直流侧输出 $12k$ 次谐波电压和电流,而谐波电压和电流的存在将降低系统的传输容量,增加系统运行损耗,为此一般在LCC直流侧配置滤波器以降低直流系统电流中的 $12k$ 次谐波分量。

现有的LCC直流滤波器主要为无源式滤波器,通常采用双调谐滤波器或三调谐滤波器,电路结构如图2所示。滤波器电路参数决定了滤波器可滤除的电流频率,一组双调谐滤波器和三调谐滤波器可分别滤除两个和三个不同频率的谐

波。对于12脉动换流器,通常采用两组双调谐滤波器或一组三调谐滤波器,其中,两组双调谐滤波器分别负责滤除12/24和12/36次谐波,一组三调谐滤波器则负责同时滤除12/24/36次谐波^[21]。

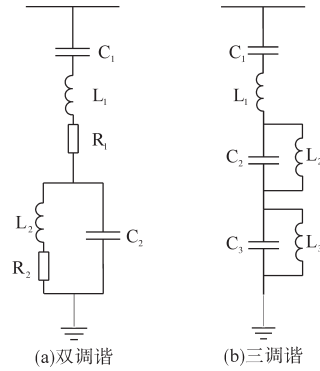


图2 直流滤波器等值电路

Fig.2 DC filter equivalent circuit

3 VSC换流器的直流谐波等效模型

在高压大容量的应用场合,VSC通常采用模块化多电平换流器(multilevel modular converter, MMC),其直流侧谐波含量低,一般无需在直流侧配置滤波器。

VSC直流侧谐波等值电路如图3所示,考虑到VSC换流器三个相单元结构的对称性,混联型LCC-VSC系统直流侧的谐波电流 i_{3p_out} 将在三个相单元中均分,即流过每一相桥臂的电流可以表示为 $i_{3p_out}/3$ 。因此,对于VSC的一个相单元,有如下表达式:

$$\int \frac{i_{3p_out}}{3C_{phase}} dt + 2L_0 \frac{d(i_{3p_out}/3)}{dt} = u_{3p_vsc} \quad (4)$$

式中: C_{phase} 为VSC换流器任一相单元的等值电容; u_{3p_vsc} 为LCC直流侧谐波经直流系统结构传递到VSC侧的谐波电压。

考虑到任意时刻每个相单元 $2N$ 个子模块中的 N 个子模块导通(N 为桥臂子模块数),可得到 $C_{phase} = 2C_0/N$, C_0 为每个模块的电容。

对式(4)进行等价变形可得:

$$\int \frac{i_{3p_out}}{C_{eq}} dt + L_{eq} \frac{di_{3p_out}}{dt} = u_{3p_vsc} \quad (5)$$

从而,VSC直流侧谐波分析模型可由一个大小为 C_{eq} 的电容和一个大小为 L_{eq} 的电感的串联形式的无源元件等值。 C_{eq} 和 L_{eq} 的表达式为

$$\begin{cases} C_{eq} = \frac{6C_0}{N} \\ L_{eq} = \frac{2}{3} L_0 \end{cases} \quad (6)$$

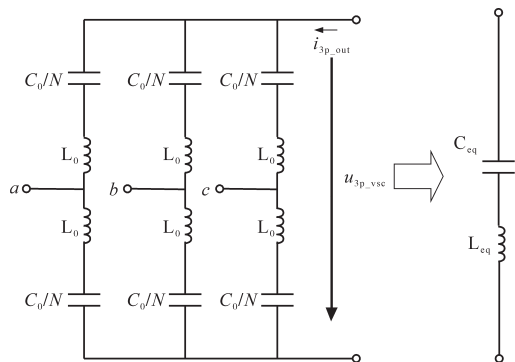


图3 VSC直流侧谐波等值电路

Fig.3 DC side harmonic equivalent circuit of VSC

4 受端混联型LCC-VSC直流侧谐波模型

考虑到混联型LCC-VSC系统为真双极系统,正常运行时正、负极保持对称运行,因此针对系统直流侧的谐波计算取正、负极中的任一极分析即可。结合前述直流系统各元件的谐波等效模型,可建立用于分析混联型LCC-VSC系统直流侧谐波的等效模型,如图4所示。其中,下标rec,inv分别表示整流侧和逆变侧LCC。

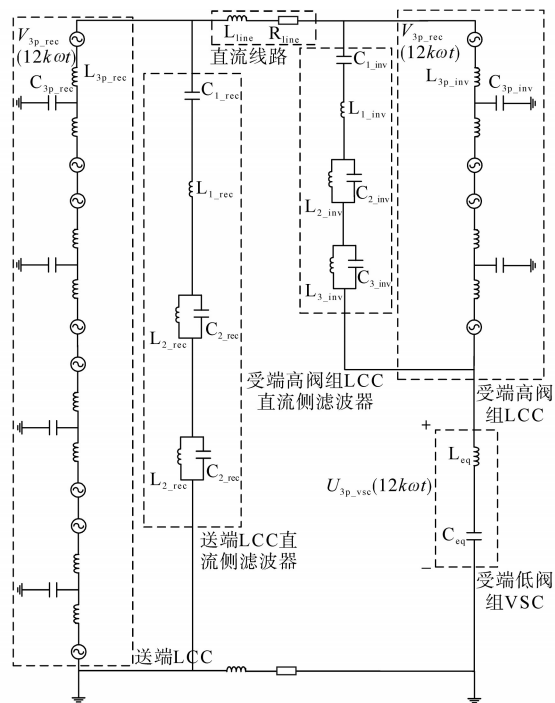


图4 受端混联型LCC-VSC系统直流侧谐波的等效模型

Fig.4 Equivalent DC side harmonics model of receiving end hybrid LCC-VSC

图中, U_{3p_vsc} 为VSC直流侧的谐波电压,考虑到LCC的谐波特性, U_{3p_vsc} 主要包括 $12k$ 次谐波分量。对于每一种频率的谐波分量,可分别按照正弦稳态电路的分析方法进行求解。

5 算例

受端混联型LCC-VSC系统拓扑结构采用类似白鹤滩工程拓扑结构,如图5所示,直流输电系统的整流侧采用LCC,而逆变侧则采用高压阀组LCC与低压阀组三端并联VSC相串联的结构,其参数如表1所示。

表1 受端混联型LCC-VSC模型参数

Tab.1 Parameters of the receiving end hybrid LCC-VSC

参数	数值
高压电容 C_1	0.35 μF
高压电感 L_1	89.35 mH
直流滤波器(双调谐式)	
滤波电阻 R	10 000 Ω
低压电容 C_2	0.81 μF
低压电感 L_2	48.86 mH
单位长度等效电阻 r_0	0.055 Ω/km
单位长度等效电感 l_0	1.29 mH/km
直流线路	
整流站—逆变站间的线路长度 L	100 km
MMC ₁ —MMC ₂ 间的线路长度 L_{1-2}	50 km
MMC ₂ —MMC ₃ 间的线路长度 L_{2-3}	100 km
MMC换流器	
桥臂电感 L_{arm}	26 mH
子模块电容 C_{sm}	9 750 μF

以下主要对算例系统直流侧谐波进行仿真验证,主要从谐波频次和谐波幅值两个方面来开展。其中,谐波频次由谐波源(即LCC换流器)的直流侧输出决定,可通过直流场内任一点的电压、电流响应进行验证;谐波幅值的验证包含LCC的等值谐波源验证和VSC谐波响应验证两个部分。

5.1 直流谐波频次验证

考虑到直流谐波频次不受直流场内选取的分析点的影响,取送端LCC正极直流母线电压、电流为分析对象,其频谱分析结果如图6和图7所示。

由图6、图7可知,送端LCC换流器直流侧电压、电流谐波响应主要以 $12k$ 倍频为主,与前面理论分析结果一致。值得说明的是,图6所示频谱分析结果是计及LCC直流滤波器的滤波作用后得到的,可以看到,在 $12/24$ 倍频的双调谐直流滤波器作用下,LCC直流侧电压波动将不再以 12 和 24 倍频分量为,取而代之的是频率次低的 $12k$ 倍频分量(如 $36, 48, 60$ 倍频);由图7可知,LCC直流侧电流依然以 12 倍频分量为,其次为 $36, 60$ 和 72 倍频。

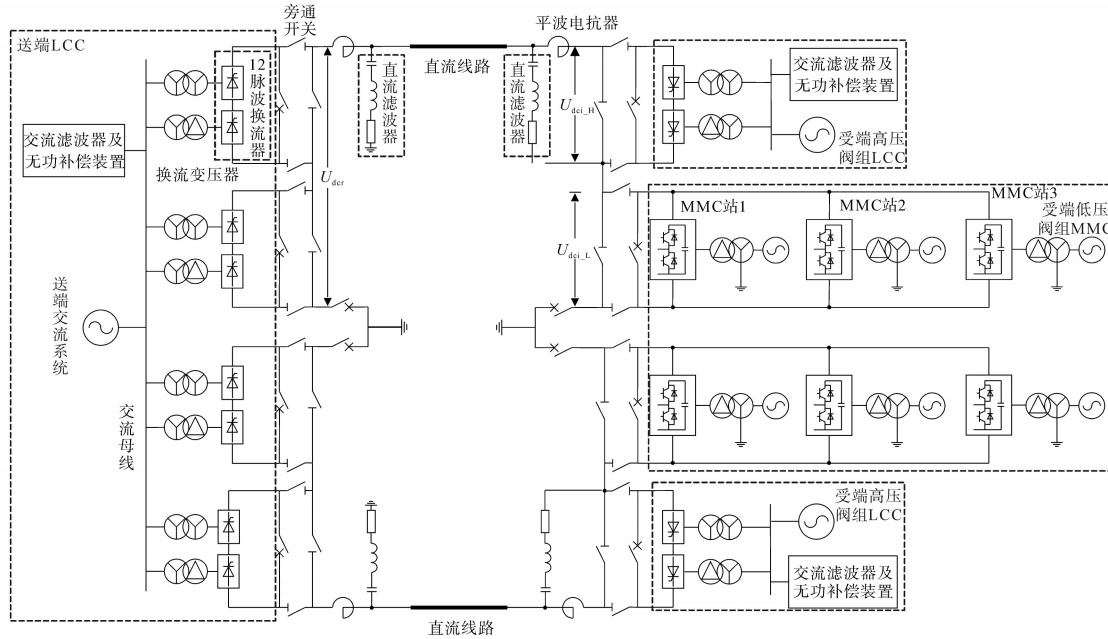


图5 受端混联型LCC-VSC算例拓扑结构

Fig.5 Topology of receiving end hybrid LCC-VSC case

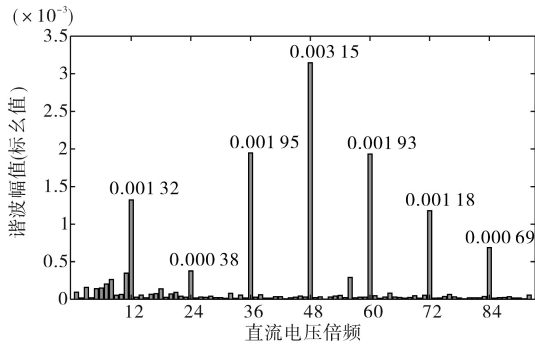


图6 送端LCC正极直流电压频谱分析结果

Fig.6 Spectrum analysis results of DC voltage of LCC at sending end

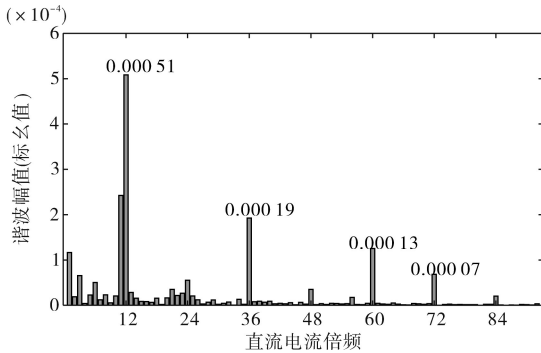


图7 送端LCC正极直流电流频谱分析结果

Fig.7 Spectrum analysis results of DC current of LCC at sending end

5.2 直流侧谐波幅值验证

根据表1的参数,可建立混联型LCC-VSC系统直流侧谐波的等效模型,如图8所示。其中, $V_{LCC_rec(\omega)}$, $V_{LCC_inv(\omega)}$ 分别表示送端和受端LCC的谐

波电压源相量,与谐波角频率 ω 有关, $u_{dc_MMC(\omega)}$ 表示对应频率下MMC直流侧电压响应。由前述分析可知,混联型LCC-VSC系统直流谐波频次为 $12k$,以下在各个 $12k$ 次频率下对送、受端LCC谐波电压源 $V_{LCC_rec(\omega)}$, $V_{LCC_inv(\omega)}$ 以及MMC直流侧电压响应 $u_{dc_MMC(\omega)}$ 进行仿真验证。

由式(3)计算 $V_{LCC_rec(\omega)}$, $V_{LCC_inv(\omega)}$ 的理论值,此外通过对实例的仿真可以得到 $V_{LCC_rec(\omega)}$ 和 $V_{LCC_inv(\omega)}$ 的真实值,其结果如表2所示。送端LCC谐波源最大误差为1.54%,受端高压阀组LCC谐波源最大误差为8.31%,均不超过10%。对于受端VSC,其直流电压谐波和直流电流谐波误差都比较小,如表3所示,验证了上述理论的正确性和有效性。

表2 LCC谐波电压源的仿真验证

Tab.2 Verification of LCC harmonic voltage source

谐波源	谐波频次	理论计算值	实际仿真值	相对误差/%
$V_{LCC_rec(\omega)}$	12	22.42∠1.88	22.08∠1.88	1.54
	24	5.77∠-0.21	5.72∠-0.18	0.87
	36	5.76∠-1.75	5.91∠-1.76	2.54
	48	7.06∠1.99	7.05∠1.95	0.14
	60	5.78∠-0.73	5.60∠-0.80	3.21
	$V_{LCC_inv(\omega)}$	12	3.26∠2.97	3.01∠2.88
24		18.36∠-2.56	18.79∠-2.55	2.29
36		5.06∠-1.46	4.96∠-1.41	2.02
48		6.61∠-0.26	6.45∠-0.28	2.48
60		6.69∠1.72	6.86∠1.69	2.48

表3 VSC谐波电压源的仿真验证

Tab.3 Verification of VSC harmonic voltage source

	谐波频次	理论值	实际值	相对误差/%
VSC 侧直流 电压谐波	12	0.059 5 kV	0.060 0 kV	1.00
	24	0.022 9 kV	0.023 0 kV	1.20
	36	0.138 1 kV	0.139 3 kV	0.86
	48	0.040 6 kV	0.041 2 kV	1.46
	60	0.154 4 kV	0.152 2 kV	1.45
VSC 侧直流 电流谐波	12	0.925 A	0.936 A	1.20
	24	0.176 A	0.179 A	1.50
	36	0.707 A	0.705 A	0.28
	48	0.156 A	0.148 A	5.13
	60	0.474 A	0.470 A	0.85

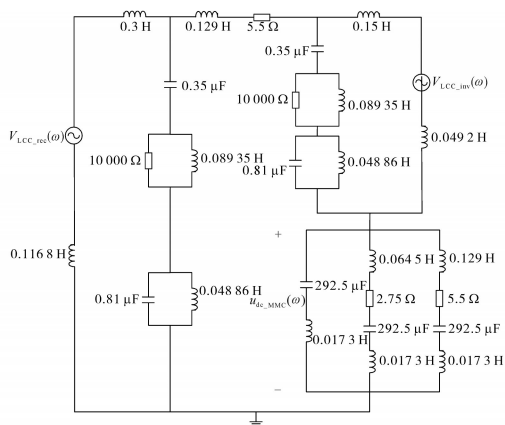


图8 算例直流侧谐波的等效模型

Fig.8 Equivalent DC side harmonics model of the case

6 结论

通过研究LCC,VSC和直流滤波器的拓扑结构和变换特性得到LCC,VSC和直流滤波器的直流侧谐波等效模型。在此基础上,考虑受端混联型LCC-VSC系统的拓扑结构和连接方式,提出其直流侧谐波计算等效模型。通过某混合直流输电实例验证所提直流侧谐波计算结果与仿真结果的误差不超过10%,验证了其有效性和准确性。该项目成果可以指导受端混联型LCC-VSC的控制保护技术。

参考文献

- [1] 赵良,郭强,覃琴,等.特高压同步电网稳定特性分析[J].中国电机工程学报,2008,28(34):47-51.
Zhao Liang, Guo Qiang, Qin Qin, *et al.* Analysis on stability characteristics of UHV Synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 47-51.
- [2] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等.直流输电系统电压等级序列研究[J].中国电机工程学报,2008,28(10):1-8.
Liu Zhenya, Shu Yinbiao, Zhang Wenliang, *et al.* Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.
- [3] Xue Y, Zhang X P, Yang C H. AC filter-less flexible LCC HVDC with reduced voltage rating of controllable capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5507-5518.
- [4] Xiao Hao, Li Yinhong, Lan Tongkun. Sending end AC faults can cause commutation failure in LCC-HVDC inverters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2554-2557.
- [5] 徐政,陈海荣.电压源换流器型直流输电技术综述[J].高压技术,2007,33(1):1-10.
Xu Zheng, Chen Hairong. Review and applications of VSC-HVDC[J]. High Voltage Technology, 2007, 33(1): 1-10.
- [6] 王林,郭贤朝,姚涛涛,等.MMC-HVDC的新型交流故障穿越策略[J].电气传动,2020,50(12):48-53.
Wang Lin, Guo Xianchao, Yao Chuantao, *et al.* A new AC fault ride-through strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Drive, 2020, 50(12): 48-53.
- [7] 李力,郭佩乾.适用于多端柔性直流配电网的改进控制策略[J].电气传动,2021,51(12):28-34.
Li Li, Guo Peiqian. An advanced control strategy for flexible multi-terminal DC distribution network[J]. Electric Drive, 2021, 51(12): 28-34.
- [8] 袁小威,王金梅,苗海东,等.基于LCC的高压直流输电换流站无功功率控制策略研究[J].电气传动,2021,51(13):14-19.
Yuan Xiaowei, Wang Jinmei, Miao Haidong, *et al.* Research on the reactive power control strategy of HVDC converter station based on LCC[J]. Electric Drive, 2021, 51(13): 14-19.
- [9] 洪潮,代锋,曾德辉,等.基于开关函数的LCC-HVDC输电系统谐波计算方法[J].南方电网技术,2021,15(3):1-7.
Hong C, Dai F, Zeng D H, *et al.* Harmonic calculation method of LCC-HVDC transmission system based on switching function[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3): 1-7.
- [10] 贺杨祥,郑晓冬,邵能灵,等.交直流混联电网LCC-HVDC换流器建模方法综述[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3119-3130.
He Y Y, Zheng X D, Tai N L, *et al.* A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119-3130.
- [11] 郭春义,赵剑,刘炜,等.抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):1-10.
Guo Chunyi, Zhao Jian, Liu Wei, *et al.* A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.
- [12] Wang Yizhen, Wen Weijie, Wang Chengshan, *et al.* Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC-HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 169-176.
- [13] Wang Yizhen, Yuan Zhichang, Fu Jiao. A novel strategy on smooth connection of an offline MMC station into MTDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 568-574.

(下转第48页)

- [9] 李吉祥,赵晋斌,屈克庆,等.考虑SOC特性的微电网VSG运行参数边界分析[J].电网技术,2018,42(5):1451-1457.
Li Jixiang, Zhao Jinbin, Qu Keqing, *et al.* Boundary analysis of operation parameters of microgrid VSG considering SOC characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1451-1457.
- [10] 孙大卫,刘辉,高舜安,等.电流控制型虚拟同步发电机的小信号建模与稳定性分析[J].电网技术,2018,42(9):2983-2993.
Sun Dawei, Liu Hui, Gao Shunan, *et al.* Small signal modeling and stability analysis of current controlled virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2983-2993.
- [11] Feng X, Liu J. Impedance specifications for stable DC distributed power systems[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2020, 17(2): 157-162.
- [12] Suryanarayana H, Sudhoff S. Refinements in generalized impedance based stability analysis of DC power electronics based distribution systems[C]//IEEE Electric Ship Technologies Symposium(ESTS). IEEE, 2015: 80-85.
- [13] Riccobono A, Santi E. A novel passivity-based stability criterion (PBSC) for switching converter DC distribution systems[C]//Twenty Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), 2018: 2560-2567.
- [14] Siegers J, Arrua S. Allowable bus impedance region for MVDC distribution systems and stabilizing controller design using positive feed-forward control[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), 2016: 1-8.
- [15] Kanzian M, Gietler H. Low-complexity state-space-based system identification and controller auto-tuning method for multi-phase DC-DC converters[J]. IEEE Trans. on Ind. Appl., 2018, 55(2): 2076-2087.
- [16] Abdollahi H, Arrua S. A novel DC power distribution system stabilization method based on adaptive resonance enhanced voltage controller[J]. IEEE Trans. on Ind. Electron., 2019, 66(7): 5653-5662.
- [17] Abdollahi H, Khodamoradi A. Online bus impedance estimation and stabilization of DC power distribution systems: A method based on source converter loop-gain measurement[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC): 3371-3378.
- [18] Chen F, Burgos R. Investigation of nonlinear droop control in DC power distribution systems: load sharing, voltage regulation, efficiency and stability[J]. IEEE Trans. on Power Electron., 2019, 25(2): 1076-1087.
- [19] Aldhaheer A, Etemadi A H. Stabilization and performance preservation of DC-DC cascaded systems by diminishing output impedance magnitude[J]. IEEE Trans. on Ind. Appl., 2017, 54(2): 1481-1489.
- [14] 张艳霞,王海东,李婷,等.LCC-VSC混合直流输电线路的复合型单端故障定位方法[J].电力系统自动化,2019,43(21): 187-194.
Zhang Yanxia, Wang Haidong, Li Ting, *et al.* Combined single-end fault location method for LCC-VSC hybrid HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 187-194.
- [15] Rao Hong, Zhou Yuebin, Xu Shukai, *et al.* Key technologies of ultra-high voltage hybrid LCC-VSC MTDC systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 365-373.
- [16] 丁海龙,袁志昌,吴爱军,等.混合双馈入直流系统最大传输功率控制策略研究[J].电工技术学报,2020,35(2): 330-336.
Ding Hailong, Yuan Zhichang, Wu Aijun, *et al.* Research on control strategy for maximum power transmission in doubly-fed hybrid DC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 330-336.
- [17] 刘炜,郭春义,杨硕,等.混合双馈入直流输电系统的交互作用机理研究(一):等值单馈入直流输电模型[J].中国电机工程学报,2020,40(18): 5911-5921.
Liu Wei, Guo Chunyi, Yang Shuo, *et al.* Research on interaction mechanism of hybrid dual-infeed HVDC system (Part I): equivalent single-infeed HVDC model[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5911-5921.
- [18] 马文轩,李斌,王一振,等.受端混联型LCC-MMC直流输电系统的自适应电压协调控制方法[J].高电压技术,2021, 47(12): 4518-4527.
Ma W X, Li B, Wang Y Z, *et al.* Adaptive voltage coordinated control method of receiving end hybrid LCC-MMC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4518-4527.
- [19] 楼伯良,华文,王国腾,等.白鹤滩直流逆变站技术路线对浙江省多直流换相失败的影响分析[J].浙江电力,2019, 38(8): 47-53.
Lou Boliang, Hua Wen, Wang Guoteng, *et al.* Analysis on impact of technical routes on multi-infeed DC commutation failure of Baihetan HVDC inverter station[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 47-53.
- [20] 邸世民,向往,林卫星,等.混合级联直流输电系统主动谐波补偿控制[J].电力系统自动化,2021, 45(22): 134-145.
Di Shimin, Xiang Wang, Lin Weixing, *et al.* Active harmonic compensation control for hybrid cascaded HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 134-145.
- [21] 杜夏冰,赵成勇,吾方劫,等.LCC-HVDC系统混合型有源滤波器谐振抑制策略[J].电力系统自动化,2021, 45(4): 115-122.
Du Xiabing, Zhao Chengyong, Wu Fangjie, *et al.* Resonance suppression strategy of hybrid active power filter in LCC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 115-122.

收稿日期:2021-02-14

修改稿日期:2021-05-13

(上接第23页)

收稿日期:2021-09-07

修改稿日期:2021-09-24