

DOI: 10.7500/AEPS20130620013

# LCC-MMC混合直流输电系统直流侧谐波电流计算

张哲任, 徐政, 薛英林

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

**摘要:** 针对一种在整流侧和逆变侧分别采用电网换相型换流器和模块化多电平换流器(MMC)的混合直流输电系统, 提出了直流侧谐波电流频率计算方法和完整流程。在整流侧采用三脉动谐波电压源, 等效了12脉动换流器的谐波输出特性; 在逆变侧使用电容串联电感的无源结构, 作为MMC直流侧等效电路; 线路参数计算中采用了全相非解耦模型的改进算法。与基于PSCAD/EMTDC搭建数字仿真模型进行直流侧谐波电流计算结果的比较, 验证了提出方法的准确性。

**关键词:** 混合高压直流输电; 直流线路; 谐波电流; 计算流程

## 0 引言

近年来, 随着电力电子技术的发展, 基于全控型器件的模块化多电平换流器(MMC)极大地促进了高压直流输电(HVDC)技术的发展。作为电压源型换流器(VSC)的一种, MMC在具有VSC所有优势的同时, 还兼具器件一致触发动态均压要求低、扩展性好、开关频率低以及运行损耗低等诸多优势, 在新能源并网、改善城市配电以及海岛供电等场合下得到了广泛的使用<sup>[1-4]</sup>。

柔性直流输电应用于远距离、大容量架空线路输电的一个主要问题是直流侧故障的自清除问题<sup>[5]</sup>, 由于目前还没有真正商业化应用的高压大容量直流断路器, 柔性直流输电系统在直流侧故障时采用的是跳交流侧开关的方法来清除直流侧故障。根据ABB公司在Caprivi Link工程<sup>[6-7]</sup>中的经验, 这种方法从故障开始到清除故障并恢复到故障前功率水平的时间为1~2 s, 与传统直流输电处理类似故障时间为0.5 s左右还有差距。为此, 文献[8-9]提出了一种在整流侧和逆变侧分别采用电网换相型换流器(LCC)和MMC型换流器的混合式直流输电系统拓扑结构。为了使得这种混合式直流输电系统具有直流侧故障自清除能力, 必须在逆变器直流侧出口处串联单向导通的二极管阀。这种混合结构被认为是解决中国远距离、大容量输电问题的一个极具竞争力的方案。因此, 迫切需要对上述结构的直流输电系统设计技术进行研究。

正常运行时, 由于换流器的非线性特性, 直流输

电线上会产生大量音频范围内的谐波电压和諕波电流。通过容性耦合、感性和阻性耦合, 谐波电压和諕波电流会对电信线路中的音频电话回路产生干扰, 降低通话质量<sup>[10]</sup>。一般需在直流输电系统的直流侧加装直流滤波器, 将音频范围内的干扰控制在允许水平之内。为了能够合理而有效地配置直流滤波器, 通常需根据工程的实际特性在理论上计算沿线各点的各次諕波电流, 然后折算为等效干扰电流进行衡量<sup>[11]</sup>。因此, 各次諕波电流计算的准确性直接关系到滤波器设计的准确性, 谐波电流计算也就相应地成为了直流滤波器设计的基础。从理论上来讲, 可以基于时域仿真软件搭建足够精确的仿真模型, 然后计算其諕波电流。尽管该方法可以提供较为精确的计算结果, 但是数字仿真需要耗费大量时间和计算机硬件。考虑到直流滤波器设计必须满足在所有运行工况和功率水平下的諕波特性要求, 数字仿真并不太适合于此时的諕波电流计算。因此, 本文针对LCC-MMC混合直流输电系统, 提出了使用解析公式计算其直流侧諕波电流的一套完整流程。然后, 基于电磁暂态仿真计算软件PSCAD/EMTDC, 搭建相应的数字仿真平台, 验证了所提出方法的有效性。

## 1 混合直流输电系统的数学模型

以双端单极直流输电系统为例, LCC-MMC混合直流输电系统的接线如图1所示。图中:  $U_{sr}$ ,  $U_{si}$ 分别为整流侧和逆变侧的网侧母线电压;  $Z_{sr}$ ,  $Z_{si}$ 为交流系统的等值阻抗;  $T_{ar}$ ,  $T_{br}$ 为整流侧变压器;  $T_i$ 为逆变侧变压器。整流侧由12脉动换流器构成, 逆变侧则由MMC构成。 $D_p$ 为装设在逆变侧直流母线出口处的大功率二极管阀, 用于阻断发生直流故障时的故障电流通路, 正常运行时  $D_p$  可以用一个

收稿日期: 2013-06-20; 修回日期: 2014-06-23。

国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目  
(2012AA051704)。

短路支路等效。

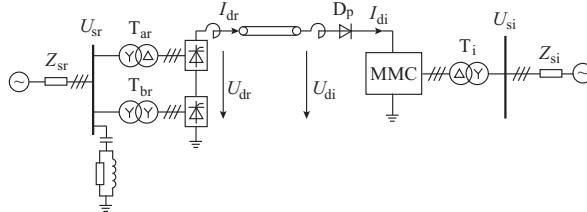


图 1 混合直流输电系统拓扑结构

Fig.1 Topological structure of a hybrid HVDC system

### 1.1 整流侧换流器的数学模型

参考现有 LCC-HVDC 工程, 整流侧采用 12 脉动换流器。稳态运行状态下, 整流侧 LCC 满足以下关系<sup>[12]</sup>:

$$U_{dr} = 2.7U_r \cos \alpha - \frac{6}{\pi} X_{rl} I_{dr} \quad (1)$$

$$P_{dr} = 2U_{dr} I_{dr} \quad (2)$$

$$Q_{cr} = P_{dr} \tan \phi_r \quad (3)$$

$$\cos \phi_r = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)}{2} \quad (4)$$

式中:  $U_r$  为换流变压器阀侧空载线电压有效值;  $U_{dr}$  为整流站直流电压;  $I_{dr}$  为换流器输出直流电流;  $P_{dr}$  为直流功率;  $Q_{cr}$  为换流器吸收的无功功率;  $X_{rl}$  为每相换相电抗;  $\cos \phi_r$  为功率因数;  $\alpha$  为触发角;  $\mu$  为换相重叠角。

### 1.2 逆变侧换流器的数学模型

在稳态运行状态下, 根据能量守恒原理, 换流器交、直流侧的电压、电流存在以下关系<sup>[13-14]</sup>:

$$\begin{cases} P_i + jQ_i = \sqrt{3}U_i(I_i(\cos \varphi_i + j\sin \varphi_i)) \\ P_{dci} = U_{dci}I_{di} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_{pk} = \frac{1}{3}I_{di} + \frac{1}{2}i_k + i_{circk} \\ i_{nk} = \frac{1}{3}I_{di} - \frac{1}{2}i_k + i_{circk} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_i, Q_i$  分别为交流系统注入 MMC 的有功功率和无功功率, 对应的功率因数角为  $\varphi_i$ ;  $P_{dci}$  为换流器的直流输出功率;  $U_i$  为换流器交流侧线电压有效值;  $U_{dci}$  为换流器直流侧正负极之间直流电压;  $I_i$  为换流器交流侧线电流有效值;  $I_{di}$  为 MMC 输出的直流电流;  $i_{pk}, i_{circk}$  分别为  $k$  相的桥臂电流和环流,  $k$  (取 a, b, c) 表示三相交流系统中的某一相;  $i_k$  为换流器交流侧  $k$  相电流瞬时值。

### 1.3 直流线路的数学模型

定义传播常数矩阵为:

$$\Gamma = (\mathbf{Z}\mathbf{Y})^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{Z}, \mathbf{Y}$  分别为输电线路的单位长度串联阻抗矩

阵和并联导纳矩阵。

根据多相耦合线路非解耦模型的推导结果<sup>[15]</sup>, 输电线路的导纳矩阵为:

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_s & -\mathbf{Y}_m \\ -\mathbf{Y}_m & \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{Z}^{-1} \Gamma \sinh^{-1}(\Gamma l) \cosh(\Gamma l) \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}_m = \mathbf{Z}^{-1} \Gamma \sinh^{-1}(\Gamma l) \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{Y}_s, \mathbf{Y}_m$  分别为对应多相耦合输电线路的自导纳矩阵和互导纳矩阵;  $l$  为线路长度。

### 2 混合直流输电系统直流侧谐波电流的计算方法

本文考虑的直流侧设备主要包括: 换流器、平波电抗器、直流滤波器以及直流线路等, 下面将分别对其中几个关键的直流侧设备进行分析建模。

#### 2.1 直流线路首末端节点电压计算

##### 2.1.1 LCC 三脉动谐波电压源的计算

三脉动谐波电压源<sup>[16-18]</sup>是计算直流侧各次谐波电流的前提条件。12 脉动换流器相对应的三脉动模型结构如图 2 所示。

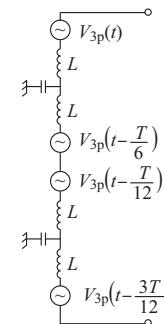


图 2 12 脉动桥的三脉动模型

Fig.2 12-pulse bridge modeled with 3-pulse model

文献[16]根据图 1 三脉动组 1 中 3 个阀的导通情况, 将一个周期的电压波形分为 6 段, 利用傅里叶分解, 得到三脉动模型各次谐波电压源。按相似的计算过程, 可方便获得 12 脉动换流器中另外 3 个三脉动组的各次电压, 其差别仅在于它们的交流初相角不同。

##### 2.1.2 MMC 直流侧等效电路的计算

根据文献[19], 在直流谐波分析中, MMC 可以等效成谐波电压源。但是在电平数较大的 MMC-HVDC 场合下, MMC 产生的等效干扰电流非常小<sup>[19]</sup>, 与 LCC-HVDC<sup>[20]</sup>相比, 可以忽略不计。因此, 在本文的研究中, 不考虑 MMC 产生的谐波, 把 MMC 等效成无源元件处理。

只考虑直流侧谐波电流, 在图 3 所示的 MMC 中, 考虑到 MMC 的 3 个相单元在结构上的完全对

称性, 直流电流  $I_{di}$  中的  $n$  次谐波分量  $I_{di(n)}$  会平均分配到每个相单元中。

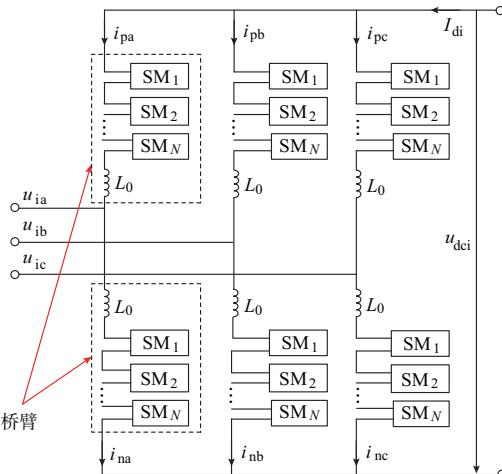


图 3 MMC 结构

Fig.3 Basic structure of an MMC

只考虑直流侧谐波电流对 MMC 输出电压的影响, 能够得到:

$$N \int \frac{I_{di(n)}}{3C} dt + L \frac{d}{dt} \left( \frac{I_{di(n)}}{3} \right) = U_{dci(n)} \quad (11)$$

式中:  $C = 2C_0$ , 其中  $C_0$  为子模块电容大小;  $L = 2L_0$ , 其中  $L_0$  为桥臂电抗大小;  $U_{dci(n)}$  为在 MMC 两端的  $n$  次谐波电压分量;  $N$  为每个桥臂上的子模块个数。

从直流侧往 MMC 看过去, 则式(11)可以转化为:

$$\int \frac{I_{di(n)}}{C'} dt + \frac{2}{3} L_0 \frac{dI_{di(n)}}{dt} = U_{dci(n)} \quad (12)$$

式中:  $C' = 6C_0/N$ 。

因此, 若不考虑 MMC 产生的谐波, 在直流侧谐波电流的计算过程中, MMC 可以等效成为一个大小为  $6C_0/N$  的电容和一个大小为  $2L_0/3$  电抗的串联形式的无源元件。

### 2.1.3 混合直流输电系统直流侧网络

根据上文内容, 与传统直流系统<sup>[21]</sup>类似, 混合直流输电系统直流侧网络如图 4 所示。对于 12 脉动换流器, 等效的杂散电容反映了套管、阀绕组以及变压器的交流绕组与阀绕组之间对地的电容, 且换流器星形绕组和三角形绕组对应的电容值略有不同。三脉动谐波电压源是考虑了各种不对称因素之后的理论计算量。平波电抗器、直流滤波器以及中性线接地电容组成了直流侧的滤波系统。在本文的假设条件下, MMC 在直流侧可以等效成为无源元件。

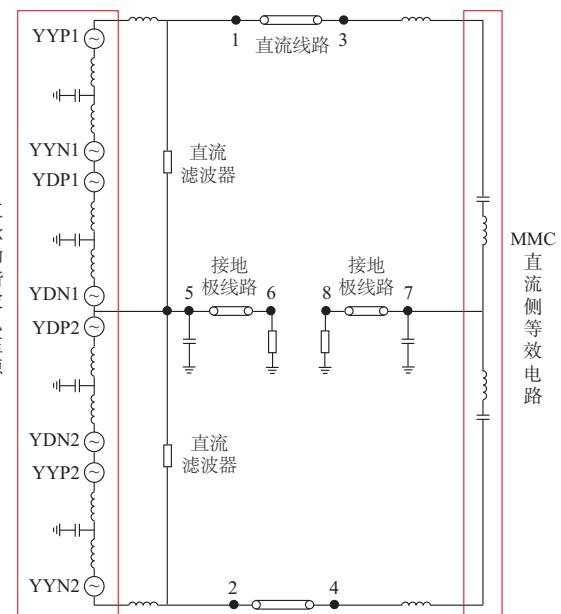


图 4 混合直流输电系统直流网络结构

Fig.4 Structure diagram for a hybrid HVDC system

随后, 把已经求得的 LCC 三脉动谐波电压源、直流线路等效导纳矩阵以及 MMC 直流侧等效电路等引入混合直流输电系统网络中, 利用诺顿等效, 将电压源转化为电流源, 作为注入电流  $\mathbf{I}$  注入直流网络, 根据节点方程  $\mathbf{I} = \mathbf{YU}$ , 即可得到直流网络各节点电压, 也就得到了直流输电线路始端和终端的电压。

### 2.2 直流线路谐波电流和沿线等效干扰电流的计算

#### 2.2.1 直流线路谐波电流的计算

在已经求得整条直流输电线路首末端节点电压的基础上, 可以根据以下两个步骤求解直流输电线上任意位置上(设该点为图 5 中的节点  $r, s$ )谐波电流。

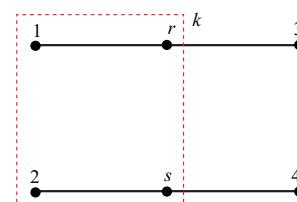


图 5 分段线路示意图  
Fig.5 Schematic of divided DC transmission line

1) 首先求解输电线路首末端(节点 1, 2, 3, 4)的谐波电流。因为图 5 中节点 1, 2, 3, 4 的电压已经求得, 那么根据式(8)可以得到:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1-2} \\ \mathbf{I}_{3-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_s & -\mathbf{Y}_m \\ -\mathbf{Y}_m & \mathbf{Y}_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1-2} \\ \mathbf{U}_{3-4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $\mathbf{I}_{1-2}, \mathbf{I}_{3-4}$  分别为直流线路始端和终端的谐波

电流;  $\mathbf{U}_{1-2}, \mathbf{U}_{3-4}$  分别为直流线路始端和终端的谐波电压。

2) 显然, 对于节点  $1, 2, r, s$  构成的那部分线路(如图 5 中虚线框所示, 记为  $k$ ), 结合文献[22]与电网络理论, 可以通过节点  $1, 2$  的电流电压求解节点  $r, s$  的电流电压, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{rs} \\ \mathbf{I}_{rs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{mk}^{-1} \mathbf{Y}_{sk} & -\mathbf{Y}_{mk}^{-1} \\ \mathbf{Y}_{sk} \mathbf{Y}_{mk}^{-1} \mathbf{Y}_{sk} - \mathbf{Y}_{mk} & -\mathbf{Y}_{sk} \mathbf{Y}_{mk}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1-2} \\ \mathbf{I}_{1-2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{U}_{rs}, \mathbf{I}_{rs}$  分别为节点  $r, s$  的电压和电流;  $\mathbf{Y}_{sk}, \mathbf{Y}_{mk}$  分别为线路  $k$  的自导纳矩阵和互导纳矩阵。

对于本文讨论的 2 根直流极线和 2 根架空地线的结构, 假设其架空地线始端节点编号为  $g_1$  和  $g_2$ ; 节点  $r, s$  处架空地线节点编号为  $g_r$  和  $g_s$ 。那么对应于这 8 个节点, 存在着相应的关系:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{1-2} \\ \mathbf{I}_{g_1-g_2} \\ \cdots \\ \mathbf{I}_{rs} \\ \mathbf{I}_{gr-gs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{sk}' & -\mathbf{Y}_{mk}' \\ -\mathbf{Y}_{mk}' & \mathbf{Y}_{sk}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1-2} \\ \mathbf{U}_{g_1-g_2} \\ \cdots \\ \mathbf{U}_{rs} \\ \mathbf{U}_{gr-gs} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{Y}_{sk}', \mathbf{Y}_{mk}'$  分别为这 4 条线路的自导纳矩阵和互导纳矩阵, 均为  $4 \times 4$  阶;  $\mathbf{U}_{g_1-g_2}, \mathbf{U}_{gr-gs}$  分别节点  $g_1, g_2$  和  $g_r, g_s$  的谐波电压;  $\mathbf{I}_{g_1-g_2}, \mathbf{I}_{gr-gs}$  分别节点  $g_1, g_2$  和  $g_r, g_s$  的谐波电流。

由于架空地线可靠接地, 那么  $\mathbf{U}_{g_1-g_2}$  和  $\mathbf{U}_{g_3-g_4}$  都等于  $\mathbf{0}$ 。因此架空地线任意点  $g_r$  和  $g_s$  上的谐波电流可以通过式(15)计算得到。

## 2.2.2 沿线等效干扰电流的计算

参照实际 LCC-HVDC 工程, 直流谐波水平普遍采用等效干扰电流来描述。等效干扰电流是所有谐波频率即  $50 \sim 2500$  Hz 的噪声加权残余电流<sup>[21]</sup>。鉴于 MMC 产生的谐波电流非常小, 且本文没有考虑 MMC 自身产生的谐波, 因此本文定义直流线路上任意一点  $x$  处的等效干扰电流为:

$$I_e(x) = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} (I_{rec}(n, x) P(n) H_f)^2} \quad (16)$$

式中:  $I_{rec}(n, x)$  为距离整流侧  $x$  的  $n$  次残余电流均方根值;  $P(n)$  为  $n$  次谐波噪声加权系数;  $H_f$  为耦合

系数, 表示典型明线耦合阻抗对频率的标幺化关系。

## 2.3 直流侧谐波电流的计算流程

综上所述, LCC-MMC 混合直流输电系统直流侧谐波电流的计算流程如下。

步骤 1: 对于整流侧 LCC, 根据系统工况, 利用傅里叶分解, 计算 12 脉动换流器三脉动模型各次谐波电压源。对于逆变侧 MMC, 根据 2.2 节内容, 计算其直流侧等效参数。对于直流输电线路, 根据 1.3 节内容计算仅考虑其首端和末端的等效导纳矩阵。

步骤 2: 利用节点分析法, 通过求解混合直流输电系统的直流侧网络, 得到直流输电线路的首端节点和末端节点的电压。

步骤 3: 在已知直流线路首末端口节点电压的基础上, 利用式(13), 求解分段直流输电线路首末端节点的电流。而后根据式(14)和式(15), 就可以求得直流输电线路和架空地线任意点的谐波电流。沿线的等效干扰电流可以通过式(16)求得。

步骤 4: 通过重复步骤 1 至步骤 4 的过程, 依次求解需要考虑的所有工况下直流线路上的谐波电流和沿线等效干扰电流。

## 3 仿真验证及分析

为了验证所提出的 LCC-MMC 直流侧谐波电流计算方法的正确性, 验证算例基于一个额定电压为  $\pm 500$  kV、额定功率为 3 000 MW 的双极混合直流输电系统。该系统未配置直流滤波器, 运行于双极全压状态下。利用本文算法计算线路入口处谐波电流, 同时在 PSCAD/EMTDC 中搭建相应的系统模型进行仿真计算, 然后对两者的结果进行比较。主要系统参数见附录 A 表 A1。整流侧谐波源采用三脉动电压源模型, 其中, YYP, YYN, YDP, YDN 分别代表 4 个串联的三脉动谐波电压源, 整流侧正负极三脉动谐波电压源电压幅值如表 1 所示。谐波电流对比测试点为图 4 中节点 1, 2, 3, 4, 对比结果如表 2 所示。

由表 2 可见, 本文算法与 PSCAD/EMTDC 仿真结果偏差较小, 验证了本文算法的正确性和适用性。

表 1 三脉动谐波电压源电压幅值  
Table 1 Three-pulse harmonic voltage magnitude

谐波次数	整流侧三脉动源电压幅值/V				逆变侧三脉动源电压幅值/V			
	YYP1	YYN1	YDP1	YDN1	YYP2	YYN2	YDP2	YDN2
2	2 134.9	2 109.0	2 098.0	2 120.6	2 157.6	2 108.6	2 118.1	2 117.0
12	6 384.5	6 390.8	6 438.7	6 436.5	6 477.5	6 479.9	6 522.0	6 524.4
24	2 239.7	2 266.3	2 261.7	2 253.4	2 348.5	2 357.8	2 352.8	2 361.3

**表 2 直流输电线路首末端谐波电流有效值**  
**Table 2 Effective value of harmonic currents at ends of DC transmission lines**

节点 编号	谐波 次数	谐波电流幅值/A	
		PSCAD/EMTDC	本文算法
1	2	49.55	49.70
	12	15.86	15.87
	24	3.01	3.01
2	2	49.56	49.70
	12	16.21	16.21
	24	3.17	3.18
3	2	52.63	52.82
	12	11.58	11.57
	24	1.22	1.22
4	2	52.64	52.84
	12	11.40	11.38
	24	1.27	1.26

#### 4 沿线等效干扰电流和諧波电流计算结果

本节内容基于对双极全压额定直流功率该工况中LCC侧不装直流滤波器、装设1组直流滤波器以及装设2组直流滤波器3种情况的计算。本文考虑在直流侧装设12/24/36三调谐滤波器来限制直流线路上的諺波电流和等效干扰电流。滤波器结构如图6所示,初步配置参数见附录A表A2。

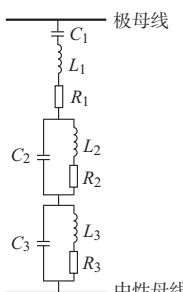


图6 无源三调谐滤波器结构示意图

Fig.6 Schematic of passive DC filter arrangement

图7给出了2种情况下沿线等效干扰电流水平。

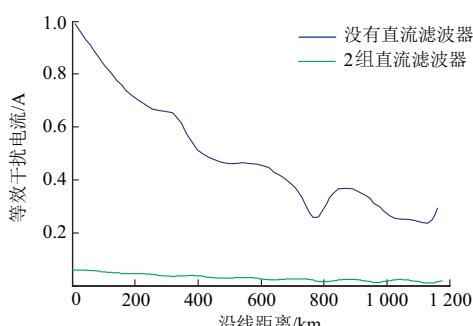


图7 2种滤波器配置情况下等效干扰电流的沿线分布

Fig.7 Distribution of equivalent disturbing current along DC transmission lines with two DC filter installations

图8和图9给出了2种情况下正极直流线路上部分次谐波电流有效值的沿线分布。

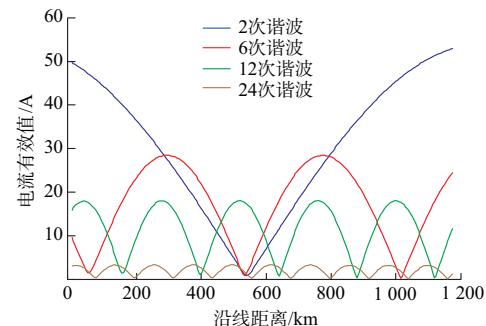


图8 没有直流滤波器时正极直流线路上部分次谐波沿线分布情况

Fig.8 Distribution of harmonic currents along positive DC transmission line with no DC filters installed

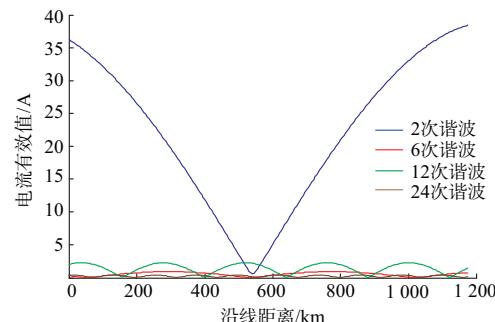


图9 装设2组直流滤波器时正极直流线路上部分次谐波沿线分布情况

Fig.9 Distribution of harmonic currents along positive DC transmission line with two DC filters installed at each poles of LCC

#### 5 结语

本文针对LCC-MMC混合直流输电系统,提出了计算其直流侧諺波电流的频率分解计算完整方法和流程。通过与基于PSCAD的时域仿真结果进行对比,两种计算方法的计算结果较为一致,从而验证了本文所提出方法的有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

#### 参考文献

- [1] 赵成勇,胡静,翟晓萌,等.模块化多电平换流器桥臂电抗器参数设计方法[J].电力系统自动化,2013,37(15):89-94.  
ZHAO Chengyong, HU Jing, ZHAI Xiaomeng, et al. A parameter design method of bridge arm reactor in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 89-94.
- [2] 刘钟淇,宋强,刘文华.基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J].电力系统自动化,2010,34(2):53-58.  
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system

- based on modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [3] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [4] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等.模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J].电力系统自动化,2010,34(2):48-52.
- GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [5] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等.模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
- ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [6] JACOBSON D A N, WANG P, KARAWITA C, et al. Planning the next nelson river HVDC development phase considering LCC vs. VSC technology [C]// CIGRE General Meeting, August 26-31, 2012, Paris, France: 1-12.
- [7] MAGG T G, MANCHEN M, KRIGE E, et al. Caprivi link HVDC interconnector: comparison between energized system testing and real-time simulator testing [C]// CIGRE General Meeting, August 26-31, 2012, Paris, France.
- [8] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [9] 徐政,唐庚,黄弘扬,等.消解多直流馈入问题的两种新技术[J].南方电网技术,2013,7(1):6-14.
- XU Zheng, TANG Geng, HUANG Hongyang, et al. Two new technologies for eliminating the problems with multiple HVDC infeeds[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 6-14.
- [10] 张继东,李建华,方万良,等.云广±800 kV 特高压直流线路通信干扰计算[J].西安交通大学学报,2009,43(4):106-110.
- ZHANG Jidong, LI Jianhua, FANG Wanliang, et al. Calculation of telecommunication interference caused by Yunnan—Guangdong ± 800 kV ultra-high voltage DC transmission link[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(4): 106-110.
- [11] 黄莹,孙帮新,黎小林,等.云广±800 kV 直流输电工程直流等效干扰电流限值研究[J].南方电网技术,2007,1(1):32-36.
- HUANG Ying, SUN Bangxin, LI Xiaolin, et al. Study on the limits of equivalent disturbing current for Yun—Guang ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 32-36.
- [12] 浙江大学发电教研组直流输电科研组.直流输电[M].北京:电力工业出版社,1982.
- [13] ILVES K, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(1): 57-68.
- [14] 管敏渊,徐政.模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J].电力系统自动化,2010,34(19):64-68.
- GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.
- [15] 徐政.耦合长线稳态分析的非解耦模型及其算法[J].中国电机工程学报,1995,15(5):342-346.
- XU Zheng. Coupled model and its computation for steady state analysis of multiphase transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(5): 342-346.
- [16] 王峰,游广增,黄莹,等.高压直流输电 3 脉动谐波电压源计算[J].高电压技术,2009,35(10):2586-2590.
- WANG Feng, YOU Guangzeng, HUANG Ying, et al. Calculation of three-pulse harmonic voltage source for HVDC transmission [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2586-2590.
- [17] 李战鹰,李建华,夏道止.±800 kV 特高压直流输电系统特征谐波分析[J].电网技术,2009,35(10):2586-2590.
- LI Zhanying, LI Jianhua, XIA Daozhi. Analysis of characteristic harmonics in ± 800 kV ultra-high voltage direct current power transmission system [J]. Power System Technology, 2009, 35(10): 2586-2590.
- [18] 李战鹰,任震.基于三脉波模型的高压直流输电系统直流侧谐波分析及滤波方案设计[J].继电器,2004,32(23):15-17.
- LI Zhanying, REN Zhen. DC side harmonic analysis and filter scheme design using the three-pulse model in HVDC system [J]. Relay, 2004, 32(23): 15-17.
- [19] 宋强,许树楷,罗雨,等.柔性直流输电系统的直流线路谐波分析方法[C]//2012 年中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会学术年会论文集,2012 年 8 月 21-24 日,北京.
- [20] 孙中明.葛南直流滤波器性能研究[J].高电压技术,2004, 30(11):65-67.
- SUN Zhongming. Study on DC filter performance of Gezhouba—Nanqiao HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 65-67.
- [21] 王峰,朱光友,游广增,等.高压直流输电直流侧谐波电流计算[J].高电压技术,2009,35(9):2275-2279.
- WANG Feng, ZHU Guangyou, YOU Guangzeng, et al. Calculation of DC side harmonic currents for HVDC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (9): 2275-2279.
- [22] 徐韬,翁华,徐政,等.高压直流输电非解耦线路模型改进算法[J].中国电机工程学报,2010,30(4):71-76.
- XU Tao, WENG Hua, XU Zheng, et al. An improved calculating method for the coupled line model of HVDC transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 71-76.

张哲任(1988—),男,博士研究生,主要研究方向:直流输电与柔性交流输电。E-mail: 3071001296zhang@zju.edu.cn

徐政(1962—),男,通信作者,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、风力发电技术与风电场并网技术。E-mail: xuzheng007@zju.edu.cn

薛英林(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:直流输电与柔性交流输电。

(编辑 孔丽蓓)

(下转第 135 页 continued on page 135)

## Calculation of DC Side Harmonic Currents for LCC-MMC Hybrid HVDC Transmission System

ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** For a hybrid high-voltage direct current (HVDC) transmission system using the line commutated converter (LCC) at the rectifier side and the modular multilevel converter (MMC) at the inverter side, a calculation method and the complete process of harmonic current at the DC side are proposed. Firstly, the LCC at the rectifier side is replaced by the three-pulse harmonic voltage source, whose harmonic output characteristic is equivalent to a twelve-pulse converter. Secondly, the MMC is represented by a passive electric network, with an improved calculating method for the coupled line model introduced for calculating the admittance matrix of DC transmission lines. Finally, by comparing with harmonic current calculation results at the DC side of a digital simulation model based on PSCAD/EMTDC, the accuracy of the proposed method is verified.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA051704).

**Key words:** hybrid high-voltage direct current transmission; DC line; harmonic current; calculation process