

DOI: 10.7667/PSPC150593

特高压直流输电系统非特征谐波分析

周国伟, 顾用地, 周建平, 刘德

(国网浙江省电力公司检修分公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 特高压直流输电(UHVDC)以其特有的大容量、远距离、高电压等优点, 在国内迅速发展起来。针对特高压直流输电系统普遍存在的网侧非特征谐波电流问题, 展开了一系列的研究。首先理论分析了特高压换流变阻抗不平衡和触发角不平衡时, 5、7次等非特征谐波电流的产生。其次, 根据国内某一实际的UHVDC相关运行参数, 以PSCAD/EMTDC软件为平台, 搭建了其仿真分析模型。最后, 重点针对换流变阻抗不平衡和触发角不平衡两种情况, 计算了网侧5、7次非特征谐波电流。仿真结果表明, 换流变阻抗不平衡对交直流互联系统的影响较小; 换流器触发角不平衡时, 网侧5、7次非特征谐波电流较大, 超出了谐波电流含量最大1%的标准, 对交直流互联系统的影响较大。

关键词: UHVDC; 非特征谐波; 换流变阻抗; 触发角; PSCAD/EMTDC

Analysis of non-characteristic harmonic in UHVDC system

ZHOU Guowei, GU Yongdi, ZHOU Jianping, LIU De

(Maintenance Company of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Ultra High Voltage Direct Current (UHVDC) has a rapid development in China by means of its special large capacity, long distance, high voltage and so on. This paper carries out a series of research on AC non-characteristic harmonic currents of UHVDC system. Firstly, it theoretically analyzes the appearance of 5/7 times non-characteristic harmonic currents at the unbalanced converter transformer impedance and trigger angle of UHVDC. Then, according to a real domestic UHVDC operation parameter, a simulation module is established by PSCAD/EMTDC. Finally, aiming at two major cases that the unbalanced converter transformer impedance and trigger angle of UHVDC, it calculates the AC 5/7 times harmonic currents. The simulation results show that the unbalance converter transformer impedance has less influence on AC/DC power system while the lopsided trigger angle indeed has a relatively large influence that AC 5/7 times harmonic currents appear greater, exceeding the current harmonic content maximum standard of 1%.

Key words: UHVDC; non-characteristic harmonic; converter transformer impedance; trigger angle; PSCAD/EMTDC

0 引言

特高压直流输电(UHVDC)以其特有的大容量、远距离, 高电压等优点^[1-3], 近年在国内迅速发展起来。目前国内已陆续建成向家坝-上海, 锦屏-苏南, 哈密南-郑州, 云南-广东, 云南普洱-广东江门, 溪洛渡左岸-浙江金华等6条±800 kV特高压直流输电系统。特高压输电工程中换流站内主要的设备包括换流变压器、交直流滤波器、平波电抗器、换流阀等^[4-5]。根据目前特高压直流输电工程投运情况, 普遍存在的一个问题就是谐波, 网侧谐波电流主要分为特征谐波(如11、13等次谐波电

流)和非特征谐波(如5、7等次谐波电流)。直流侧通过换流器流入交流侧的谐波电流, 会对交流系统的稳定性有很大的影响^[6-8], 近年来国内许多专家对此问题进行了广泛的研究, 并提出了不同的研究方法。

研究交直流互联系统的谐波问题主要有开关函数法^[9-10]、蒙特卡洛法^[11]、时域仿真法^[12]等。文献^[9-10]基于换流器的开关函数模型, 研究了特高压直流输电的谐波问题, 计算了网侧交流电压不对称, 换流器三相参数不平衡等因素对网侧谐波电流的影响, 但是开关函数模型在建模中并没有考虑换流器的换相过程, 而实际运行工况有一定

差别。文献[11]建立时域蒙特卡洛模型, 可以同时分析交流侧母线电压不对称、换流变三相阻抗不对称等情况对网侧非特征谐波电流的影响, 但是蒙特卡洛法基于产生伪随机数思想, 就有可能与现场实际不同, 而且蒙特卡洛算法计算量太大, 准确性的提高速度较慢。文献[12]通过建立特高压直流输电工程的 PSCAD/EMTDC^[13-14]时域仿真模型, 研究其稳态和暂态下的谐波特性, 但并没有具体针对非特征谐波的研究。由于换流站内交流滤波器设计技术的进步与成熟, 实际上, 特征谐波的含量已明显被限制, 基本符合有关标准, 恰恰是由于各种不平衡因素的存在, 网侧非特征谐波电流问题已经越来越突出^[15-18]。

本文针对国内某一实际特高压直流输电工程网侧 5、7 次谐波电流含量超标的实际情况, 基于该工程的实际运行参数, 采用比较精确的时域仿真法, 建立 PSCAD/EMTDC 仿真模型, 分析计算了换流变阻抗和触发角不平衡时网侧 5、7 次非特征谐波电流的大小, 对进一步研究网侧非特征谐波电流对交流直流互联系统的影响有重要的参考意义。

1 直流输电系统谐波理论

±800 kV 特高压直流输电(UHVDC)系统中采用的是双 12 脉波换流器, 由两个 12 脉波桥串联构成, 每个 12 脉波桥是由两个 6 脉波桥构成, 其中一个 6 脉波桥的换流变为星-星(Y-Y)连接, 另一个 6 脉波桥的换流变为星-三角(Y-D)连接, 两个 6 脉波桥具有 30° 的相位差。单级 2 个 6 脉波桥在交流侧通过换流变绕组相并联, 直流侧相串联构成, 4 个 6 脉波桥臂分别形成 200 kV、400 kV、600 kV、800 kV 四个电压等级。特高压直流输电系统中, 换流器是主要的谐波源, UHVDC 换流器在直流侧相当于一个谐波电压源, 产生谐波电压, 在交流侧等效于一个谐波电流源, 产生谐波电流。换流器产生的谐波又可以分为特征谐波和非特征谐波。

1.1 特高压直流输电系统的特征谐波

在理想情况下, 即不考虑换相角, 直流侧电流是恒定直流电流未含任何纹波, 换相电压为三相对称的标准正弦波, 换流器的各触发脉冲是严格等间距的, 换流变三相参数相同、结构完全对称, 换流器的特征谐波次数与换流器的脉波数相关。对于 12 脉波换流器, 阀侧产生 $12k$ 次特征谐波, 网侧产生 $12k \pm 1$ 次谐波。

对于网侧来说, 换流变的绕组连接组别不同, 其电流的波形也不同, 网侧电流的傅里叶级数展开

式为

$$\begin{cases} i(\omega t) = \frac{I_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \\ I_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\sigma}^{\sigma+2\pi} i(\omega t) d(\omega t) \\ A_n = \frac{1}{\pi} \int_{\sigma}^{\sigma+2\pi} i(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \\ B_n = \frac{1}{\pi} \int_{\sigma}^{\sigma+2\pi} i(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: ω 为基波角频率, 单位为 rad/s; σ 为某一角度; $I_0/2$ 为电流 $i(\omega t)$ 的平均值; A_n 、 B_n 为方波的 n 次谐波幅值。

对于 Y-D 联接的换流变, 电流为

$$i_{Y-D} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \dots) \quad (2)$$

对于 Y-Y 联接的换流变, 电流为

$$i_{Y-Y} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots) \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)可以看出网侧谐波次数为 $6k \pm 1$ 次。将式(2)和式(3)相加, 便得出网侧 12 脉波阀组的电流表达式如下

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} 2I_d (\sin \omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \frac{1}{23} \sin 23\omega t + \frac{1}{25} \sin 25\omega t + \dots) \quad (4)$$

由上式可以看出, k 为奇数的谐波刚好正负抵消, 剩下流入网侧的电流谐波次数为 $12k \pm 1$ 次, 即 11、13、23、25 次等, 谐波次数越高, 谐波幅值越低, 为基波幅值的 $1/(12k \pm 1)$ 。因此, $12k \pm 1$ 次谐波即是特高压直流输电系统网侧电流的特征谐波。

1.2 特高压直流输电系统的非特征谐波

特高压直流输电系统在实际运行中是不可能理想的, 系统的不平衡除了会产生特征谐波外, 还会产生其他次数的非特征谐波分量。在特高压直流输电系统中, 网侧非特征谐波的来源主要有: (a) 交流系统基波电压不平衡, 存在负序分量; (b) 交流电压含有谐波; (c) 直流电流有纹波存在; (d) 换流变变比不同, 导致 Y-Y 和 Y-D 联接的换流变相电压不同; (e) 换流变阻抗相间不平衡; (f) Y-Y 与 Y-D 联接的换流变之间阻抗不平衡; (g) Y-Y 与 Y-D 联接的换流变之间触发延迟角不平衡。

本文根据国内某一特高压直流换流站内有关设备的实际情况,研究点立足于最后两个非理想因素。阀侧直流电流 I_d 的表达式如下

$$I_d = \frac{\sqrt{6}U}{2\omega L_c} [\cos\alpha - \cos(\mu + \alpha)] \quad (5)$$

式中: U 是换流变相电压; L_c 是换流变阻抗; α 是触发延迟角; μ 是换相角。由式(5)可以看出, 直流电流 I_d 与换流变阻抗, 触发延迟角等有关。在(f)或(g)两个不平衡条件下, 均会导致实际系统中的直流电流 I_d 与式(5)表达的直流电流 I_d 有偏差, 可用下列表达式来表示直流电流

$$\begin{cases} I_{d,Y} = I_d(1 + \varepsilon_{Y-Y}) \\ I_{d,D} = I_d(1 + \varepsilon_{Y-D}) \end{cases} \quad (6)$$

随着系统的不平衡, 会出现下列两种较为严重的情况。

第一种为: $\varepsilon_{Y-Y} = 0, \varepsilon_{Y-D} = \varepsilon$ 。

其网侧直流电流表达式为

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d [(2 + \varepsilon) \sin \omega t - \varepsilon \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \varepsilon \frac{1}{7} \sin 7\omega t + (2 + \varepsilon) \frac{1}{11} \sin 11\omega t + (2 + \varepsilon) \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots] \quad (7)$$

第二种为: $\varepsilon_{Y-Y} = \varepsilon, \varepsilon_{Y-D} = -\varepsilon$ 。

其网侧直流电流表达式为

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} 2I_d (\sin \omega t - \varepsilon \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \varepsilon \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t + \dots) \quad (8)$$

根据式(7)和式(8)可知, 特高压直流系统不平衡时, 网侧会出现 5、7 次等非特征谐波电流。

2 特高压直流输电系统参数

±800 kV 特高压直流输电系统输电距离 1 670 km, 额定输送容量 8 000 MW, 每极 2 个 12 脉波阀组串联接线方式。在每极的极母线和中性母线上分别装设 3 个 50 mH 平波电抗器, 每极装设 1 组双调谐 12/24 直流滤波器和一组双调谐 2/39 次直流滤波器。

无功配置方面, 整流侧无功补偿按总容量 5 200 Mvar, 无功设备共 4 大组, 配置 10 组滤波器和 10 组并联电抗器。逆变侧无功补偿按总容量 4 879 Mvar, 无功设备共 4 大组、17 小组配置, 滤波器每小组容量为 287 Mvar。

特高压直流系统的额定运行参数如表 1 所示。整流侧和逆变侧的特高压换流变压器可以分为高端

换流变(800 kV、600 kV 两个 6 脉波桥臂)和低端换流变(400 kV、200 kV 两个 6 脉波桥臂), 其额定参数如表 2、表 3 和表 4 所示。

表 1 特高压直流系统额定运行参数

参数	参数描述	参数取值
U_{dN}	额定直流电压	±800 kV
I_{dN}	额定直流电流	5 000 A
α_N	额定触发角	15°
γ_N	额定熄弧角	17°
R_N	直流线路额定电阻	9.0 Ω
I_{max}	最大短路电流	63 kA

表 2 逆变侧高端换流变额定参数

项目	参数	
	HY	HD
额定容/MVA	382	
额定电压/kV	$(510/\sqrt{3})/(161.8/\sqrt{3})$	$(510/\sqrt{3})/(161.8)$
额定频率/Hz	50	
额定阻抗	19.9%	

表 3 逆变侧低端换流变额定参数

项目	参数	
	LY	LD
额定容/MVA	382	
额定电压/kV	$(510/\sqrt{3})/(161.8/\sqrt{3})$	$(510/\sqrt{3})/(161.8)$
额定频率/Hz	50	
额定阻抗	19%	

表 4 整流侧换流变额定参数

项目	参数	
	HY/LY	LD/LD
额定容/MVA	404	
额定电压/kV	$(510/\sqrt{3})/(161.8/\sqrt{3})$	$(510/\sqrt{3})/(161.8)$
额定频率/Hz	50	
额定阻抗	19.5%	

3 换流器不平衡时的仿真分析

3.1 系统主回路模型

本文基于 PSCAD/EMTDC 软件建立了±800 kV 特高压直流输电系统仿真模型, 如图 1 所示。模型

中所用参数均来自国内某一实际的特高压直流系统, 本文根据现场实际情况, 主要研究逆变站内的

换流变阻抗不平衡和触发角不平衡引起的非特征谐波情况。

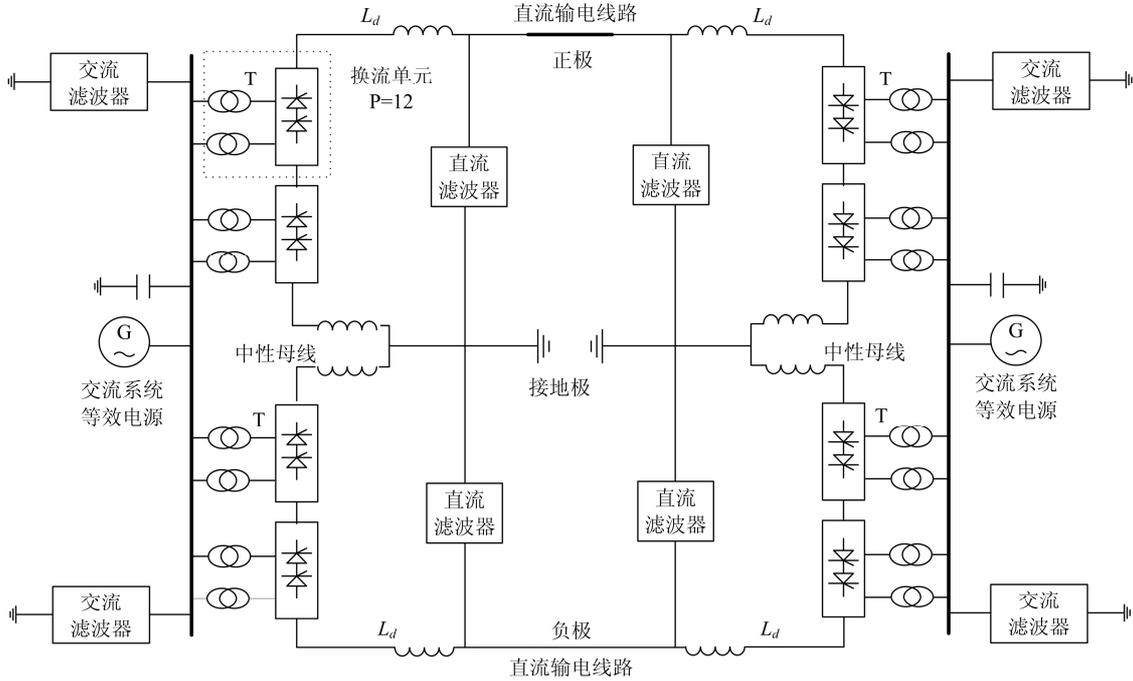


图 1 特高压直流系统仿真模型示意图

Fig. 1 Diagram of UHVDC system simulation module

3.2 换流变阻抗不平衡

换流站内的换流变由西门子和保变两家厂家制造, 因此换流变在制造过程中, 其阻抗值难免会与额定值有所偏差, 即有制造公差存在。相关规程也规定, 在交接试验验收时, 换流变阻抗的制造公差最大不超过±0.8%。

对于本文 1.2 节的非理想条件(f), 可以用式(9)来表示逆变站换流变的阻抗实际值。

$$\begin{cases} X_{Y-Y} = X_{Y-Y,N} + \Delta X_{Y-Y} \\ X_{Y-D} = X_{Y-D,N} + \Delta X_{Y-D} \end{cases} \quad (9)$$

其中: X_{Y-Y} 为 Y-Y 联接换流变阻抗, $X_{Y-Y,N}$ 为其额定阻抗, ΔX_{Y-Y} 为其制造公差; X_{Y-D} 为 Y-D 联接换流变阻抗, $X_{Y-D,N}$ 为其额定阻抗, ΔX_{Y-D} 为其制造公差。分析可知, 随着制造公差的变化, 最严重的情况即为 ΔX_{Y-Y} 和 ΔX_{Y-D} 一个正偏, 一个负偏, 分析时不妨假设 ΔX_{Y-Y} 正偏, ΔX_{Y-D} 负偏。

表 5 是厂家出厂试验给出的阻抗值, 表 6 是本文根据系统能承受的阻抗最大不平衡度而进行仿真的案例, 案例 1 为理想额定情况, 案例 6 为厂家提供的实际情况。

表 5 厂家提供的换流变阻抗

Table 5 Manufacturer-offered converter transformer impedance

换流变	HY	HD	LY	LD
额定阻抗值	19.9%		19%	
厂家阻抗值	19.56%	20%	18.54%	18.3%

表 6 仿真案例的阻抗偏差

Table 6 Impedance errors of simulation case

阻抗偏差	案例 2	案例 3	案例 4	案例 5
ΔX_{Y-Y}	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%
ΔX_{Y-D}	-0.2%	-0.4%	-0.6%	-0.8%

利用 PSCAD 软件, 建立相应的仿真模型, 得到的仿真结果如表 7 所示。其中, 案例 1 是在表 1~表 4 额定运行条件下的仿真结果, 案例 6 是在表 5 厂家实际提供的换流变阻抗条件下的仿真结果。图 2 给出了阻抗在最大不平衡度下的网侧电流波形图。图 3 给出了不同仿真案例下的各次谐波电流含量。

由表 7 和图 3 分析可知, 换流变阻抗不平衡时, 会有非特征谐波出现, 主要是 5,7 次谐波; 随着换流变不平衡度的增大, 5,7 次谐波含量明显增长, 最大可达到 0.71%, 但尚可满足特高压直流系

统网侧交流电流谐波含量不超过 1% 的标准。

表 7 换流变阻抗不平衡时的谐波电流

Table 7 Harmonic currents at unbalanced converter transformer impedance

谐波次数	1	5	7	11	13
案例 1	8287.56	0.00	0.00	24.21	23.62
案例 2	8287.58	10.00	1.57	24.26	23.67
案例 3	8284.85	25.89	5.50	24.90	24.57
案例 4	8282.35	42.27	9.61	25.55	25.46
案例 5	8279.66	59.01	13.88	26.18	26.35
案例 6	8284.23	10.05	3.31	25.85	25.62

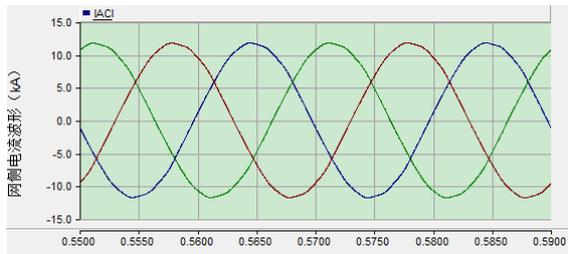


图 2 最大不平衡阻抗下的网侧电流波形

Fig. 2 AC currents waves at maximum imbalanced impedance

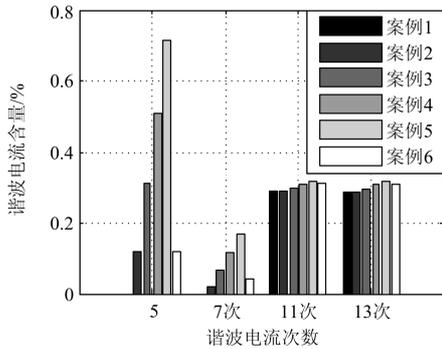


图 3 阻抗不平衡时的网侧谐波电流含量

Fig. 3 AC harmonic currents contents at imbalanced impedance

3.3 换流变触发角不平衡

根据实际运行经验，换流站内换流阀触发角由于同步信号等的影响，不可能完全平衡，相关规程也规定，换流站内触发角 α 的稳态控制范围为 $\pm 2.5^\circ$ ，前文已分析触发角不平衡也会造成非特征谐波的产生，本节通过仿真分析触发角不平衡的具体影响。对于本文 1.2 节的非理想因素(g)，可以式(10)来表示逆变侧换流器的触发角实际值。

$$\begin{cases} \alpha_{Y-Y} = \alpha_{Y-Y,N} + \Delta\alpha_{Y-Y} \\ \alpha_{Y-D} = \alpha_{Y-D,N} + \Delta\alpha_{Y-D} \end{cases} \quad (10)$$

其中： α_{Y-Y} 为 Y-Y 联接换流器触发角； $\alpha_{Y-Y,N}$ 为其额定触发角； $\Delta\alpha_{Y-Y}$ 为其稳态控制误差； α_{Y-D} 为 Y-D 联接换流器触发角， $\alpha_{Y-D,N}$ 为其额定触发角； $\Delta\alpha_{Y-D}$ 为其稳态控制误差。

表 8 是本文根据系统能承受的触发角最大稳态控制范围而进行的仿真案例。

表 8 仿真案例的触发角偏差

Table 8 Trigger angle errors of simulation case

触发角偏差	案例 1	案例 2	案例 3	案例 4	案例 5
$\Delta\alpha_{Y-Y}$	0.5°	1.0°	1.5°	2.0°	2.5°
$\Delta\alpha_{Y-D}$	-0.5°	-1.0°	-1.5°	-2.0°	-2.5°

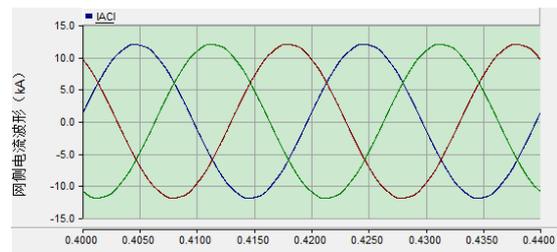
表 9 给出了上述案例下的网侧各次谐波电流值，图 4 是触发角最大不平衡情况下的网侧电流仿真波形，图 5 是各次谐波电流含量。

由表 9 和图 5 分析可知，换流器触发角不平衡时，亦会出现非特征谐波，主要是 5、7 次谐波；随着触发角不平衡度的增大，5、7 次谐波含量快速增

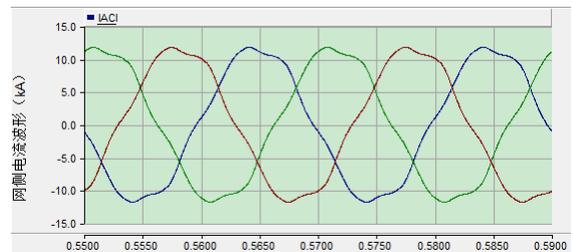
表 9 触发角不平衡时的谐波电流

Table 9 Harmonic currents at lopsided trigger angle

谐波次数	1	5	7	11	13
案例 1	8281.12	87.24	20.82	25.69	25.67
案例 2	8270.45	182.96	45.93	27.27	27.91
案例 3	8264.98	274.87	70.50	28.02	29.01
案例 4	8262.81	361.06	93.70	27.93	28.87
案例 5	8265.95	445.18	116.14	27.10	27.54



(a) 理想平衡条件下的网侧电流波形



(b) 最大不平衡触发角下的网侧电流波形

图 4 触发角不平衡时的网侧电流波形

Fig. 4 AC currents waves at lopsided trigger angle

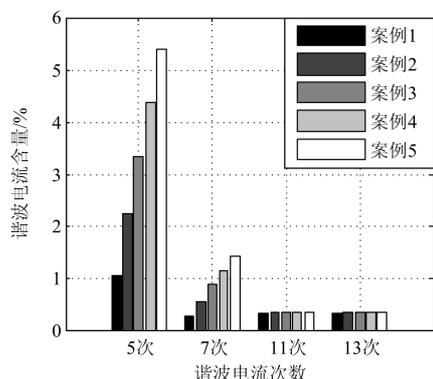


图5 触发角不平衡时的网侧谐波电流含量

Fig. 5 AC harmonic currents contents at lopsided trigger angle

长,最大可达到5.4%,远远超出了特高压直流系统网侧交流电流谐波含量不超过1%的标准。实际上,当仿真的触发角稳态偏差超过 0.5° 时,网侧5次谐波电流含量就已经达到1.05%。

4 结语

(1) 基于PSCAD/EMTDC软件,根据国内某一实际 ± 800 kV特高压直流输电系统的相关运行参数,搭建了其仿真分析模型,分析了特高压直流系统逆变侧换流器阻抗和触发角不平衡时,注入网侧的非特征谐波电流的特性。

(2) 逆变侧换流站阻抗不平衡时,网侧电流会含有以5、7次谐波电流为主的非特征谐波,不平衡度越大,非特征电流谐波的含量越大,但谐波含量总体不超过1%的标准,对交直流互联系统影响较小,相对稳定。

(3) 逆变侧换流站触发角不平衡时,网侧电流亦会产生5、7次非特征谐波电流。Y-Y联接换流变和Y-D联接换流变触发角偏差越大,非特征谐波的含量越大,5次谐波电流含量最大可达到5.4%,相对于阻抗不平衡时,对交直流互联系统的影响要大得多。

参考文献

- [1] 王曦, 李兴源, 穆子龙, 等. 溪洛渡送电广东同塔双回高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 56-61.
WANG Xi, LI Xingyuan, MU Zilong, et al. Harmonic instability in DCT-HVDC Xiluodu-Guangdong power transmission system[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 56-61.
- [2] 段立立. 含宁东直流的山东电网交直流系统PSCAD建模与仿真[D]. 保定: 华北电力大学, 2012.
DUAN Lili. PSCAD modeling and simulation of AC & DC power system of Shandong grid with NingDong

HVDC transmission system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012.

- [3] 靳玮玮, 杨兴超, 余存, 等. 功率计划在特高压直流输电工程中的传输和实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 143-147.
JIN Weiwei, YANG Xingchao, YU Cun, et al. Transmission and realization of the power plan in UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 143-147.
- [4] 张民, 贺仁睦, 孙哲, 等. 基于PSCAD/EMTDC的直流控制保护系统仿真平台及其在直流工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 112-117.
ZHANG Min, HE Renmu, SUN Zhe, et al. The HVDC control and protection simulation platform based on PSCAD/EMTDC and its application in HVDC projects[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 112-117.
- [5] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.
- [6] 莫丽琼. ± 800 kV特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 118-122.
MO Liqiong. Study on the harmonic instability of the ± 800 kV UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 118-122.
- [7] 王亚涛, 吴彦维, 李俊霞, 等. HVDC中直流线路的互感机理及其对控制系统影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 28-33.
WANG Yatao, WU Yanwei, LI Junxia, et al. Mechanism of DC transmission line's mutual inductance in HVDC and its effect on the control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 28-33.
- [8] 黄冬燕. 换流变压器替换运行仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
HUANG Dongyan. Simulation and analysis on substitution of converter transformer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [9] 王刘拴. ± 800 kV特高压直流输电系统谐波特性的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
WANG Liushuan. Harmonic characteristic research on ± 800 kV UHVDC transmission system[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [10] 杨晓妮. 特高压直流输电谐波特性的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.

- YANG Xiaoni. Study on the harmonic characteristic in UHVDC transmission system[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [11] 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[J]. 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 Montecarlo[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(5): 325-328.
- [12] 赵向磊. 基于 PSCAD 的宁东直流输电系统建模与仿真分析[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- ZHAO Xianglei. Modeling and simulation analysis of NingDong HVDC system based on PSCAD[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [13] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
- YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [14] 张雪松, 黄莉. 基于 PSCAD/EMTDC 的变压器直流偏磁仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 78-84.
- ZHANG Xuesong, HUANG Li. Simulation analysis of DC magnetic bias induced current of transformer based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 78-84.
- [15] HU Lihua, MORRISON R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(2): 973-980.
- [16] SAKUI M, FUJITA H. Calculation of harmonic currents in a three-phase converter with unbalanced power supply conditions[J]. IEE Proceedings-B, 1992, 139(5): 478-484.
- [17] HU Lihua, YACAMINI R. Non-characteristic harmonic in converters with distorted AC supplies[C] // Proceedings of the 25th UPEC Conference, 1990.
- [18] 李志铿, 王钢, 李海锋, 等. 交流不对称情况下交直流系统谐波分析计算方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 30(1): 42-47.
- LI Zhikeng, WANG Gang, LI Haifeng, et al. An analysis and calculation method of harmonic interaction between AC and DC system under asymmetric operation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 30(1): 42-47.

收稿日期: 2015-04-10; 修回日期: 2015-09-11

作者简介:

周国伟(1979-), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电气设备状态检测与故障诊断; E-mail: 13757111979@163.com

顾用地(1992-), 男, 通信作者, 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统分析与仿真计算、电力检修等; E-mail: 15158841148@163.com

周建平(1977-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。E-mail: zjoujp96@126.com

(编辑 姜新丽)