

DOI: 10.7667/PSPC171092

# 高压直流输电线路入口端谐波阻抗特性研究

余超耘, 杨汾艳, 盛超, 刘正富

(广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 空充变压器时直流线路沿线的 50 Hz 谐波分量分布与直流线路入口端谐波阻抗有关。针对直流线路入口端谐波阻抗特性展开详细研究。分析了不同直流运行方式下的直流线路入口端谐波阻抗, 定性对比其大小关系。研究了直流线路入口端谐波阻抗的解析等值模型, 并基于实际直流系统仿真模型, 分别通过解析等值法和测试信号法对不同运行方式下的直流线路入口端谐波阻抗进行计算, 验证该解析等值模型的准确性。进一步地, 根据计算结果分析直流运行方式对直流线路入口端谐波阻抗大小的影响, 所得结论与前文定性分析一致。改变换流器模型中换流变套管杂散电容的大小, 研究杂散电容对直流线路入口端谐波阻抗的影响, 实现了解析等值模型的简化。  
**关键词:** 高压直流输电; 谐波阻抗; 解析模型; 直流运行方式; 杂散电容

## Research on the characteristics of harmonic impedance at the inlet of HVDC transmission line

YU Chaoyun, YANG Fenyan, SHENG Chao, LIU Zhengfu

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The 50 Hz harmonic component distribution along HVDC transmission line when energizing a no-load transformer is related to the harmonic impedance at the inlet of HVDC line. This paper studies the characteristics of harmonic impedance at the inlet of HVDC transmission line in detail. The harmonic impedances in different operation modes are analyzed and compared with each other qualitatively. The analytical equivalence model of the harmonic impedance is studied, and its accuracy is verified by comparing the calculation results of the analytical method and the test signal method in different operation modes based on the simulation model of an actual HVDC system. Furthermore, the influence of the operation mode on the harmonic impedance is analyzed according to the analytical calculation results, and its conclusion is consistent with the above qualitative analysis. The effect of stray capacitance of the converter transformer casing on harmonic impedance at the inlet of the HVDC transmission line is studied by changing the size of stray capacitance in the converter model, and the equivalence model is simplified.

This work is supported by Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Limited Liability Company (No. GDKJQQ20152039).

**Key words:** HVDC; harmonic impedance; equivalence model; DC operation mode; stray capacitance

## 0 引言

随着高压直流输电技术的广泛应用, 我国电网已形成大规模交直流混联的格局<sup>[1-3]</sup>。交流系统扰动导致的交流电压畸变将在直流侧产生非特征谐波, 可能对交直流混联电网的稳定运行造成影响<sup>[4-8]</sup>。这给直流系统继电保护和滤波装置带来了挑战, 需要研究制定合理的应对措施。

2014 年, 溪洛渡直流曾发生多次由空载投入换流变或溪洛渡电厂主变引发的直流 50 Hz 保护动作, 导致直流降功率运行<sup>[9-10]</sup>。这是由于电力变压器空载投入电网时产生的励磁涌流含有正序 2 次谐波分量, 该分量经换流器的变换和直流线路的放大作用后, 将在直流线路末端产生大量的 50 Hz 分量<sup>[9]</sup>。直流线路沿线的 50 Hz 谐波分量分布与从线路末端看进该侧交流系统的等值谐波阻抗, 也即直流线路入口端谐波阻抗有关, 有必要针对直流线路入口端谐波阻抗特性展开详细研究。

目前对于直流系统阻抗特性的研究大多侧重于

基金项目: 广东电网有限责任公司科技项目资助 (GDKJQQ20152039)

直流回路阻抗、换流器交流与直流侧阻抗<sup>[11-15]</sup>，但仍未有直流线路入口端谐波阻抗特性方面的研究。

本文首先定性分析直流运行方式对直流线路入口端谐波阻抗的影响，并研究直流线路入口端谐波阻抗的解析等值模型。在此基础上，以实际直流系统仿真模型为背景，对比解析计算结果与时域仿真结果，以验证解析等值模型的准确性。进一步地，基于该解析等值模型，详细分析直流运行方式和换流变套管杂散电容的影响。

### 1 直流运行方式对直流线路入口端谐波阻抗特性的影响

直流线路入口端谐波阻抗特性与直流的运行方式有关，以逆变侧为例进行分析。不同工况下交流滤波器组的投切主要由无功功率控制策略决定，情况难以穷举。因此，本节定性对比不同直流运行方式下的谐波阻抗特性时，不考虑交流滤波器组投切情况的差异。

双极运行方式下，只考虑对称运行的情况。由于正、负极的对称性，流经接地极的电流为零，因此每极直流线路入口端谐波阻抗无需计及接地极线路。如图 1 中虚框所示的即为正极线路入口端谐波阻抗的示意图。由于交流系统和交流滤波器相当于两极并联，故等值到每极的阻抗为交流系统和交流滤波器阻抗的 2 倍。

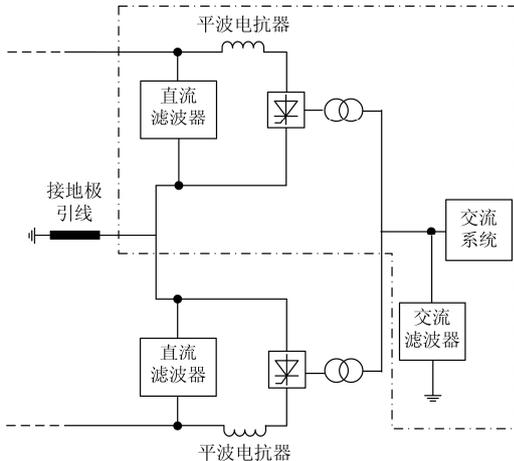


图 1 双极运行方式下直流线路入口端谐波阻抗示意图  
Fig.1 Diagram of harmonic impedance at the inlet of HVDC line in the bipolar operation mode

单极金属运行方式下，逆变侧电流不经过接地极线路，故其直流线路入口端谐波阻抗也无需计及接地极，如图 2 中虚框所示。

对比图 1 和图 2 可知，双极运行方式和单极金属回线运行方式下直流线路入口端阻抗的差异仅在

于交流系统和交流滤波器等值到每一极的阻抗。因此，当交流系统和交流滤波器的等值阻抗较小时，这两种方式下直流线路入口端等值阻抗差异不大。

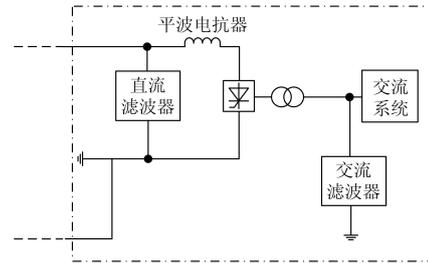


图 2 单极金属回线方式下直流线路入口端谐波阻抗示意图  
Fig.2 Diagram of harmonic impedance at the inlet of HVDC line in the unipolar metal-loop operation mode

单极大地回线运行方式下，电流经由接地极构成回路，此时的直流线路入口端阻抗相当于在单极金属回线运行方式基础上叠加了接地极线路的等值阻抗，如图 3 所示。因此，单极大地和单极金属回线运行方式下的谐波阻抗大小关系不确定，取决于接地极线路等值阻抗与图 3 虚框内其他元件等值阻抗(也即单极金属方式下的谐波阻抗)之间的幅值和相位关系。

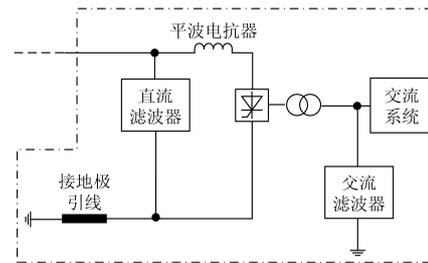


图 3 单极大地回线方式下直流线路入口端谐波阻抗示意图  
Fig.3 Diagram of harmonic impedance at the inlet of HVDC line in the unipolar earth-loop operation mode

如图 4 所示，假设单极金属回线方式下的等值阻抗向量为  $Z_1$  (黑色实线)， $R$  是以坐标原点  $O$  为圆心并经过  $Z_1$  末端  $A$  的圆。将接地极等值阻抗向量  $Z_2$  的始端置于  $A$  点，则当  $Z_2$  的末端位于圆上时(蓝色虚线)， $Z_1 + Z_2$  (蓝色实线)与  $Z_1$  的幅值相等，也即单极大地回线运行方式和单极金属回线运行方式下的谐波阻抗幅值相等，这是临界情况。当  $Z_2$  的末端位于圆外时(红色虚线)， $Z_1 + Z_2$  (红色实线)幅值大于  $Z_1$ ，此时单极大地回线方式下的谐波阻抗幅值大于单极金属回线方式。而  $Z_2$  的末端位于圆内时(绿色虚线)， $Z_1 + Z_2$  (绿色实线)幅值小于  $Z_1$ ，此时单极大地回线方式下的谐波阻抗幅值小于单极金属回线方式。

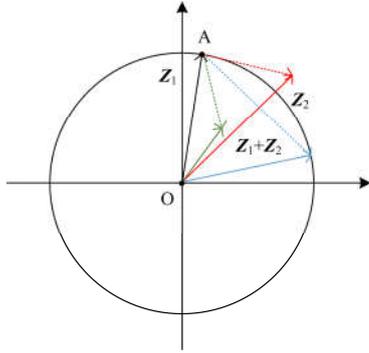


图4 单极大地回线方式下谐波阻抗向量示意图  
Fig. 4 Diagram of harmonic impedance vector in the unipolar earth-loop operation mode

## 2 直流线路入口端谐波阻抗解析模型

根据第1节可知,为解析计算直流线路入口端谐波阻抗,需要建立直流线路入口端网侧各元件的阻抗等值模型。其中,由于换流器具有非线性的特点,如何模拟换流器以及将交流系统与交流滤波器等元件等效到换流器直流侧较为复杂,可以采用以下方法进行计算。

对于单个6脉动换流器,采用直流谐波研究中应用较多的3脉动模型<sup>[16-17]</sup>,如图5所示。其中, $C_p$ 为换流变套管杂散电容,一般为10~20 nF。电感 $L_{3p}$ 为换相电感的平均值,由于换相电感在换相前后均为 $2L_c$ ,而在换相过程中为 $1.5L_c$ ( $L_c$ 为一个6脉动换流器的换相电感),因此 $L_{3p}$ 计算公式为

$$L_{3p} = \frac{1}{2} \left[ 1.5 \frac{\mu}{60} + 2 \left( 1 - \frac{\mu}{60} \right) \right] L_c \quad (1)$$

式中, $\mu$ 是对应最严重负荷情况下的换相角<sup>[12-13]</sup>。

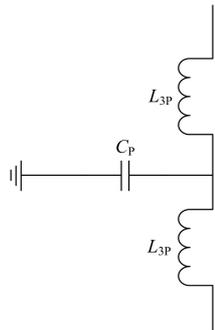


图5 换流器的3脉动模型  
Fig. 5 Three-pulse model of converter

交流系统阻抗可等效为感性阻抗 $Z_{ac}$ ,而交流滤波器等效为电阻、电感和电容串并联构成的容性阻抗 $Z_{acf}$ 。将二者的并联回路引入图5所示的换流器3脉动模型中间,如图6所示<sup>[12-13]</sup>。

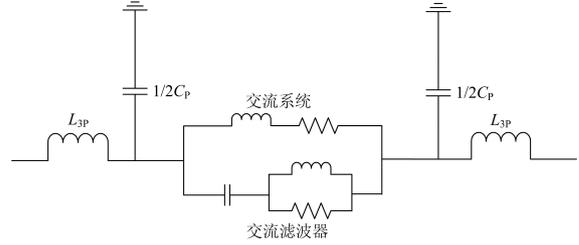


图6 考虑交流系统和交流滤波器的换流器3脉动模型  
Fig. 6 Three-pulse model of converter containing AC system and AC filter

对于交流系统,假设 $Z_{ac}$ 两端电压为 $U_{ac}$ ,电流为 $I_{ac}$ ,换流变压器变比为 $k$ ,且 $n$ 个6脉动换流器同时接到同一交流母线,则交流系统阻抗折算到换流变压器阀侧后为

$$Z_{dc1} = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{U_{ac}/k}{I_{ac}k/n} = \frac{Z_{ac}n}{k^2} \quad (2)$$

与式(1)类似,在式(2)基础上进一步考虑换相过程,对交流系统的电阻和电感分别有

$$\begin{cases} R_{dc} = \frac{[1.5\mu + 2(60 - \mu)]R_{ac}n}{60k^2} \\ L_{dc} = \frac{[1.5\mu + 2(60 - \mu)]L_{ac}n}{60k^2} \end{cases} \quad (3)$$

对于交流滤波器,其电感和电阻可仿照式(3)进行折算,而电容 $C_{acf}$ 折算至换流变压器阀侧后为

$$C_{acf,dc} = \frac{60k^2 C_{acf}}{[1.5\mu + 2(60 - \mu)]n} \quad (4)$$

根据以上分析,以双极对称运行方式为例,逆变侧正极直流线路入口端谐波阻抗的解析等值模型如图7虚方框所示,其中LC即是图6所示的考虑了交流系统和交流滤波器的换流器3脉动模型。

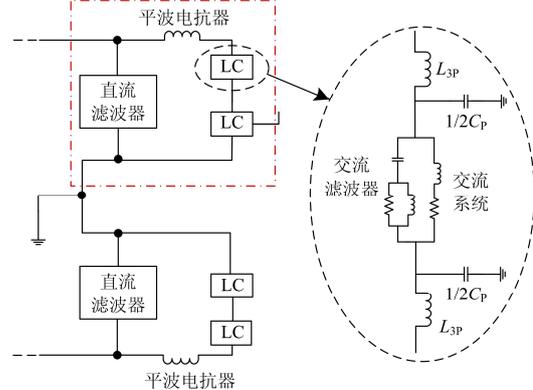


图7 双极对称运行方式下逆变侧的线路入口端谐波阻抗解析等值模型

Fig. 7 Equivalence model of harmonic impedance at the inverter-side inlet of HVDC line in the bipolar symmetrical operation mode

### 3 仿真算例

#### 3.1 直流线路入口端谐波阻抗解析模型验证

为验证上述解析模型的合理性,本文以某实际±500 kV高压直流输电系统的仿真模型为例,分别采用解析计算法和测试信号法,针对1~170 Hz逆变侧直流线路入口端的谐波阻抗特性展开分析,并将二者结果进行对比。

测试信号法计算直流线路入口端谐波阻抗的原理是:在提供稳定工作点的基础上,在直流线路入口端加上包含上述频率区间谐波信号的小值测试电压源,通过时域仿真得到对应的谐波电流信号,从而可求得直流线路入口端的谐波阻抗特性曲线。由于测试信号法全面考虑了各元件的特性,分析结果准确性较高,故可作为验证解析模型的依据<sup>[11,18]</sup>。

双极对称运行方式、单极金属回线运行方式和单极大地回线运行方式下,两种方法得到的直流线路入口端阻抗幅频特性曲线分别如图8(a)—图8(c)所示,相频特性曲线分别如图9(a)—图9(c)所示。图中,红色线表示测试信号法的结果,蓝色线表示解析计算法的结果。

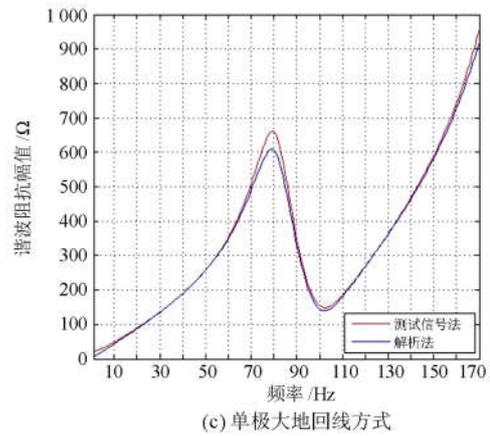
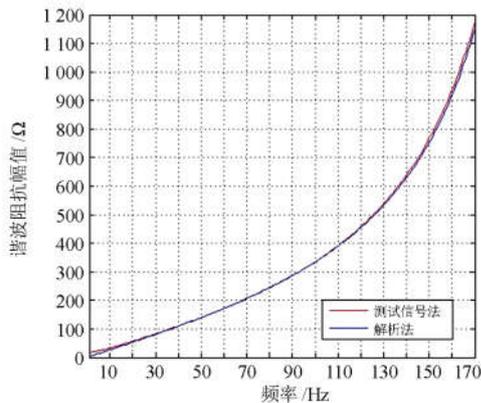


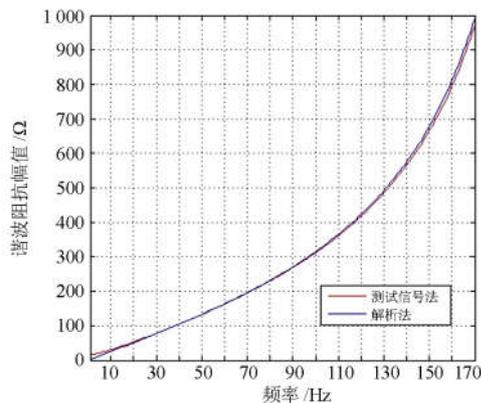
图8 不同运行方式下的阻抗幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic curves in different operation modes

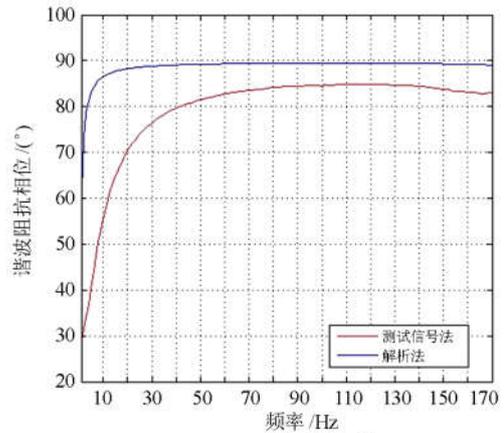
由图8和图9可知,在三种不同运行方式下,两种方法得到的幅频特性曲线几乎重叠,而在40~170 Hz相频特性曲线较为接近,这表明直流线路入口端谐波阻抗的解析等值模型是合理的。



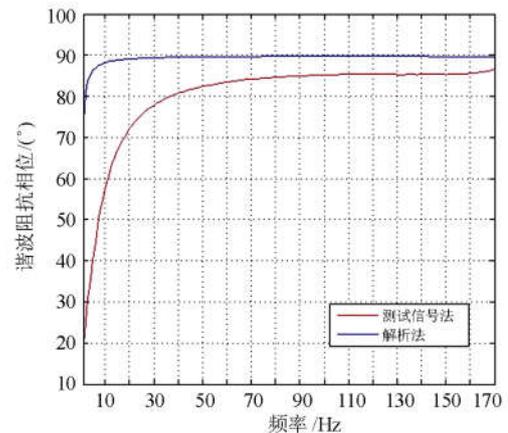
(a) 双极运行方式



(b) 单极金属回线方式



(a) 双极运行方式



(b) 单极金属回线方式

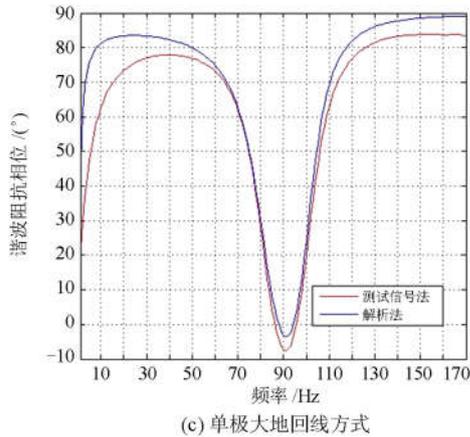


图9 不同运行方式下的阻抗相频特性曲线

Fig. 9 Phase-frequency characteristic curves in different operation modes

### 3.2 不同运行方式下的直流线路入口端谐波阻抗特性分析

下面基于解析法计算结果分析不同直流运行方式下的谐波阻抗特性。

对比图 8(a)和图 8(b)可知, 在 1~170 Hz, 双极对称运行方式和单极金属回线运行方式下的幅频特性曲线趋势一致, 均为单调递增, 且二者较为接近。这是由于此时交流滤波器和交流系统的等值阻抗较小(单极金属回线方式下该等值阻抗最大为 13 Ω), 两种运行方式下该等值阻抗的差异对直流线路入口端谐波阻抗特性的影响较小。这与第 1 节分析的结论一致。

由图 8(c)可知, 单极大地回线方式下的阻抗幅频特性曲线变化较为复杂, 具有以下两个特点:

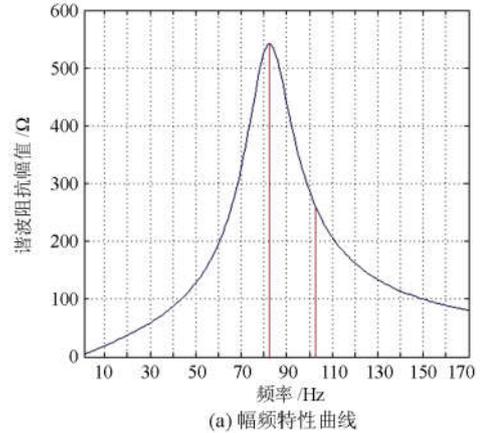
1) 在 80~102 Hz 呈现随频率增大而单调递减的趋势, 而在 1~80 Hz 和 102~170 Hz 两个频率内则单调递增。

2) 与图 8(b)进行对比可知, 在 1~91 Hz, 单极大地回线方式下的阻抗大于单极金属回线方式, 而在 92~170 Hz, 则单极大地回线方式的阻抗小于单极金属回线方式。

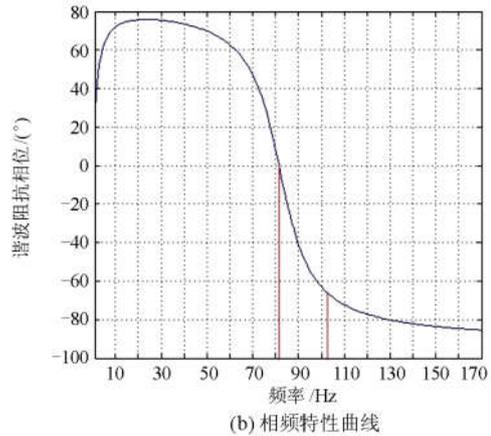
根据第 1 节, 单极大地回线方式下的阻抗  $Z$  相当于单极金属回线方式下的等值阻抗  $Z_1$  和接地极线路等值阻抗  $Z_2$  的叠加。单极金属回线方式阻抗  $Z_1$  相位基本处于  $90^\circ$  左右, 接近于纯感性, 如图 9(b) 所示。进一步考虑接地极线路阻抗  $Z_2$ , 设  $Z_2$  相角为  $\alpha$ , 则单极大地回线方式下的阻抗幅值为

$$|Z| = \sqrt{|Z_1|^2 + |Z_2|^2 + 2|Z_1||Z_2|\sin\alpha} \quad (5)$$

如图 10 所示为接地极等值阻抗的幅频和相频特性曲线。结合图 8—图 10, 针对单极大地回线方式下的阻抗幅频特性展开以下分析。



(a) 幅频特性曲线



(b) 相频特性曲线

图 10 接地极等值阻抗的幅频和相频特性曲线

Fig. 10 Amplitude and phase frequency characteristic curves of the equivalent impedance of earth electrode

1) 在 1~80 Hz,  $\alpha > 0$ , 即接地极阻抗  $Z_2$  也呈感性。又由于  $|Z_1|$  和  $|Z_2|$  均随着频率增大而增大, 因此单极大地回线方式下的阻抗幅值  $|Z|$  大于单极金属回线方式下的阻抗幅值  $|Z_1|$ , 且随着频率增大而单调递增。

2) 在 80~91 Hz, 虽然接地极阻抗  $Z_2$  为容性, 但幅值  $|Z_2|$  较大, 使得其向量末端仍处于图 4 所示的圆外, 故仍有  $|Z| > |Z_1|$ 。根据图 8(b)和图 10 可知,  $|Z_1|$  随着频率增大而增大, 而  $|Z_2|$  和  $\sin\alpha$  随频率增大而减小。由于  $|Z_2| > |Z_1|$ , 且  $|Z_2|$  减小速度快于  $|Z_1|$  增大速度, 将式(5)对频率  $f$  进行求导, 可知  $|Z|$  的单调性主要取决于  $|Z_2|$ , 单极大地回线方式下的阻抗幅频特性曲线单调递减。

3) 在 92~102 Hz, 接地极阻抗  $Z_2$  为容性。由于  $|Z_2|$  持续减小而  $|\alpha|$  持续增大, 其向量末端移至图 4 圆内, 故有  $|Z| < |Z_1|$ 。由于此时  $|Z_1|$ 、 $|Z_2|$  和  $\sin \alpha$  的单调性均与(2)相同, 且  $|Z_2|$  最小值与  $|Z_1|$  最大值差别不大, 而  $|Z_2|$  减小速度仍快于  $|Z_1|$  增大速度, 因此  $|Z|$  的单调性仍主要取决于  $|Z_2|$ , 单极大地回线方式下阻抗幅频特性曲线单调递减。

4) 在 102~170 Hz, 接地极阻抗  $Z_2$  的向量末端仍处于图 4 所示的圆内, 因此  $|Z| < |Z_1|$ 。在该区间内,  $|Z_1|$ 、 $|Z_2|$  和  $\sin \alpha$  的单调性均与(2)相同, 但  $|Z_2|$  的减小速度慢于  $|Z_1|$  的增大速度, 且  $|Z_2| < |Z_1|$ 。此时  $|Z|$  的单调性主要取决于  $|Z_1|$ , 单极大地回线方式下阻抗幅频特性曲线单调递增。

### 3.3 杂散电容对直流线路入口端谐波阻抗的影响

对于单个 6 脉动换流器, 前文采用了直流谐波现有研究中常用的 3 脉动模型。该模型在换流器的经典内电感模型基础上, 进一步考虑了换流变套管杂散电容。仍以上述直流模型的逆变侧为例, 针对直流线路入口端的谐波阻抗特性分析杂散电容的影响。

以双极对称运行方式为例进行分析。在该工况中, 直流额定功率为 3 200 MW, 换流母线额定电压为 525 kV, 交流系统阻抗为  $0.76+j5.40 \Omega$ , 因而此时短路比 SCR 为 15.8。在其解析等值模型中分别设置换流变套管杂散电容  $C_p = 10 \text{ nF}$ 、 $C_p = 20 \text{ nF}$  和无  $C_p$  三种情况, 得到直流线路入口端的谐波阻抗特性如图 11 所示。

根据图 11 可以看出, 三种情况下的阻抗特性曲线几乎重叠, 可认为此时杂散电容  $C_p$  对直流线路入口端的谐波阻抗特性不产生影响。

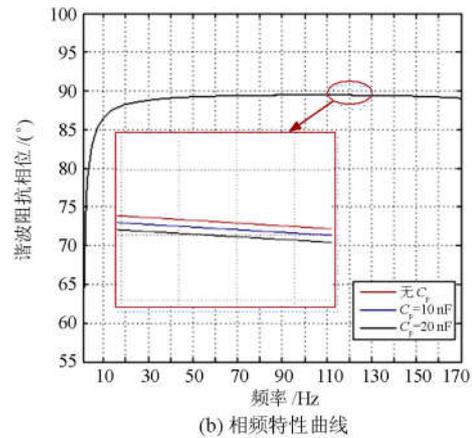
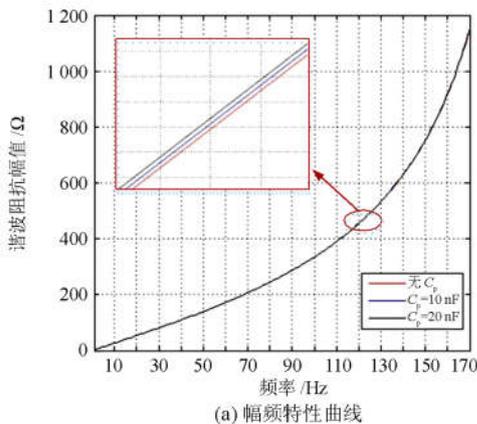


图 11 SCR=15.8 时换流变套管杂散电容的影响

Fig. 11 Influence of the stray capacitance of converter transformer casing when SCR is 15.8

进一步考虑其他短路比的情况。通过改变交流系统阻抗的大小, 使短路比 SCR=1.5。在该工况所对应的解析模型中分别对杂散电容  $C_p$  作上述三种设置, 得到直流线路入口端的谐波阻抗特性如图 12 所示, 此时三种情况下阻抗特性曲线仍然接近重叠。

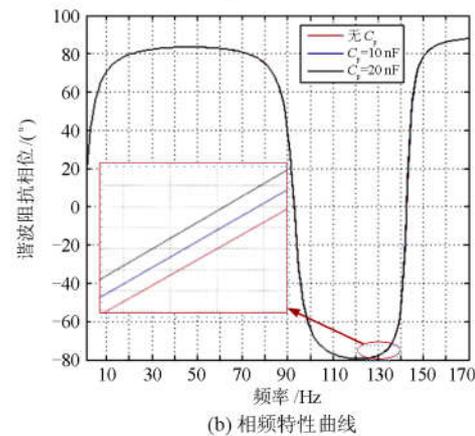
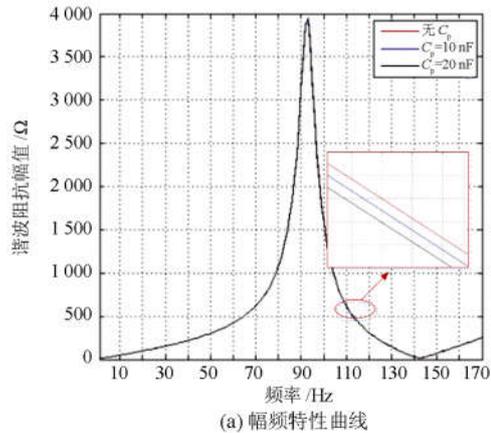


图 12 SCR=1.5 时杂散电容的影响

Fig. 12 Influence of the stray capacitance of converter transformer casing when SCR is 1.5

结合图 11 和图 12 可知: 在双极对称运行方式下, 在不同 SCR 工况中换流变套管杂散电容对直流线路入口端的谐波阻抗特性几乎不产生影响; 单极金属回线和单极大地回线运行方式下亦可得到类似结论。这是由于换流变套管杂散电容取值很小, 在很大的频率范围内, 其阻抗值均远远大于直流线路入口端谐波阻抗模型中的其他元件, 所在支路可视为开路。因此, 在分析直流线路入口端的谐波阻抗时, 可不考虑杂散电容的影响, 以简化解析等值模型。

#### 4 结论

本文针对直流线路入口端谐波阻抗特性展开详细研究, 分析了直流运行方式对谐波阻抗特性的影响, 研究了直流线路入口端谐波阻抗的解析等值模型, 得到以下结论:

1) 双极运行方式和单极金属回线运行方式下, 直流线路入口端谐波阻抗的差异仅在于交流系统和交流滤波器等值到每一极的阻抗。

2) 单极大地和单极金属回线运行方式下, 直流线路入口端谐波阻抗大小关系不确定, 取决于接地极线路等值阻抗与单极金属方式下谐波阻抗之间的幅值和相位关系。

3) 在三种不同的运行方式下, 解析法和测试信号法得到的幅频特性曲线几乎重叠, 相频特性曲线比较接近, 这表明直流线路入口端谐波阻抗的解析等值模型是合理的。

4) 不同 SCR 工况中, 换流变套管杂散电容对直流线路入口端的谐波阻抗特性均不产生影响, 故研究直流线路入口端谐波阻抗特性时, 可不考虑杂散电容支路, 简化解析等值模型。

#### 参考文献

[1] 姜臻, 苗世洪, 刘沛. 基于故障可观性的输电线路故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 1-9.  
JIANG Zhen, MIAO Shihong, LIU Pei. Fault observability model based fault location technique for transmission grids[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 1-9.

[2] 邹浩, 于仲安, 吴彪, 等. 同塔四回输电线路双端故障测距实用算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 111-116.  
ZOU Hao, YU Zhongan, WU Biao, et al. A new method of fault location with two-terminal data for four-parallel transmission lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 111-116.

[3] 凌卫家, 孙维真, 叶琳, 等. 浙江交直流混联受端电网静态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 164-170.  
LING Weijia, SUN Weizhen, YE Lin, et al. Static stability analysis of Zhejiang hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 164-170.

[4] 徐敏, 蔡泽祥, 韩昆仑, 等. 交直流混联电网中交流暂态侵入对直流继电保护的影响分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3618-3625.  
XU Min, CAI Zexiang, HAN Kunlun, et al. Influence analysis of AC system transient invasion on DC protective relaying in AC/DC hybrid power system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3618-3625.

[5] 成敬周, 徐政, 张静. 交流系统横向故障对HVDC 100 Hz 保护影响及特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 223-228.  
CHENG Jingzhou, XU Zheng, ZHANG Jing. Influence of transverse faults in HVAC power system on HVDC 100 Hz protection of HVDC transmission system and analysis on its characteristics[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 223-228.

[6] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

[7] 李晓华, 刘洋, 蔡泽祥. 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 37-45.  
LI Xiaohua, LIU Yang, CAI Zexiang. Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 37-45.

[8] 马俊民, 黄永瑞, 何青连.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37.  
MA Junmin, HUANG Yongrui, HE Qinglian. Research on harmonics of  $\pm 800$  kV ultra high voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37.

[9] 杨汾艳, 朱韬析, 丁晓兵, 等. 考虑涌流影响的直流线路 50 Hz 分量机理性研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3363-3371.  
YANG Fenyan, ZHU Taoksi, DING Xiaobing, et al. Research on 50 Hz component in HVDC transmission lines considering the influence of inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3363-3371.

[10] 樊丽娟, 黄莹, 徐迪臻, 等. 送端励磁涌流对溪洛渡直流 50 Hz 保护的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 34-38.

FAN Lijuan, HUANG Ying, XU Dizhen, et al. Impact of magnetizing inrush current at sending end on 50 Hz protection of Xiluodu HVDC transmission project[J]. South Power System Technology, 2015, 9(6): 34-38.

[11] 徐政, 裘鹏, 黄莹, 等. 采用时域仿真的高压直流输电直流回路谐振特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 36(1): 44-53.

XU Zheng, QIU Peng, HUANG Ying, et al. HVDC system DC loop resonance analysis using time domain simulation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 36(1): 44-53.

[12] 丁扬, 种芝艺, 黄杰, 等. 高压直流输电工程谐振研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 189-194.

DING Yang, ZHONG Zhiyi, HUANG Jie, et al. Study on DC resonance in HVDC power transmission projects[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 189-194.

[13] 刘心旸, 蒋维勇, 李亚男, 等.  $\pm 1100$  kV特高压直流输电工程直流系统谐振特性与抑制措施[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 202-207.

LIU Xinyang, JIANG Weiyong, LI Yanan, et al. Resonance characteristics of DC transmission line in  $\pm 1100$  kV UHVDC power transmission project and its suppression measures[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 202-207.

[14] 王钢, 李志铿, 李海锋, 等. HVDC换流器等值谐波阻抗的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 64-68.

WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng, et al. Calculation method of harmonic equivalent impedances of HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 64-68.

[15] RIEDEL P. Harmonic voltage and current transfer, and AC- and DC-side impedances of HVDC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2095-2099.

[16] SHORE N L, ANDERSSON G, CANELHAS A P, et al. A three-pulse model of DC side harmonic flow in HVDC systems[J]. IEEE Power Engineering Review, 1989, 9(7): 81-81.

[17] LARSEN E V, SUBLICH M, KAPOOR S C. Impact of stray capacitance on HVDC harmonics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 637-645.

[18] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

---

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-09-12

作者简介:

余超耘(1990—), 女, 通信作者, 硕士, 助理工程师, 主要从事直流输电及柔性输电技术的研究; E-mail: yu\_chaoyun@163.com

杨汾艳(1982—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事交直流电力系统分析的工作与研究; E-mail: yang-fenyan@163.com

盛超(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力电子和柔性输电技术方面的研究。E-mail: 13602755152@139.com

(编辑 周金梅)