

多馈入直流输电系统谐波交互影响分析

杨光亮^{1,2}, 邵能灵^{1,3}, 郑晓冬¹, 于仲安³

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450002;
3. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 多馈入直流输电系统中各换流站交流侧谐波存在交互影响现象。分别给出了多馈入直流输电系统中交流侧谐波吸收、谐波放大的定义, 描述了其发生现象, 提出了基于谐波阻抗分析方法的双馈入直流输电系统谐波交互影响分析模型, 揭示了谐波交互影响的机理。以华东电网为例, 利用 EMTDC 电磁暂态仿真软件, 建立多馈入直流输电系统模型。通过各条直流输电工程交流滤波器组合投切、交流侧故障的仿真以及实际录波数据分析, 验证了谐波交互影响现象和其发生机理, 并分析比较了非特征谐波、特征谐波放大倍数的差异。对各换流站交流侧谐波自阻抗进行了扫描分析, 结果表明两换流站交流侧等效谐波自阻抗幅值差值较大或相位差值较大是发生明显谐波吸收、放大现象的必要条件。

关键词: 多馈入直流; 直流输电; 谐波分析; 谐波阻抗; 谐波传递; 谐波吸收; 谐波放大; 谐波交互影响
中图分类号: TM 721.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.015

0 引言

随着直流输电工程的快速建设, 多馈入直流输电系统逐渐增多^[1]。目前华东电网已有葛南直流、龙政直流、宜华直流、林枫直流、向上特高压直流 5 条直流输电工程馈入, 广东电网已有江城直流、天广直流、贵广 I 回、贵广 II 回、云广特高压直流 5 条直流输电工程馈入。多馈入直流输电系统作为一个典型的系统, 各条直流由于电气距离较近, 其谐波交互影响现象突出^[2], 且各条直流线路输送的电力容量巨大, 其安全可靠的运行将对电网具有重大影响^[3-6], 多馈入直流输电系统中谐波交互影响特性及机理值得深入研究。

文献[7]对多个换流站的不同类型滤波器进行组合投切仿真时, 发现不同逆变站之间由于电气距离较近所产生的谐波交互影响可能造成投切效果和预期不同、甚至相反。文献[8]详细描述了换流器引起谐波不稳定机理, 指出谐波不仅在同一换流器的交直流侧交互影响, 还通过交流线路在不同换流站之间传递, 增加了谐波不稳定风险。文献[7-9]均描述了谐波交互影响的现象, 但没有深入探究谐波交互影响的规律。

本文首先介绍了多馈入直流输电系统中交流侧谐波传递现象, 并利用谐波阻抗分析方法, 揭示了其产生机理。利用 EMTDC 电磁暂态仿真软件, 建立华东电网多馈入直流输电系统简化模型, 通过对各换流站交流滤波器组合投切、交流侧故障的仿真

和录波数据分析, 验证了各换流站之间存在谐波吸收、放大现象, 并对各换流站交流侧谐波自阻抗和谐波相角进行了扫描分析, 验证了谐波吸收、谐波放大的产生机理。

1 谐波交互影响介绍

多馈入直流输电系统中交流侧谐波交互影响的现象可分为谐波吸收、谐波放大、谐波失稳 3 种, 下面给出了这 3 种现象的定义及产生原因, 并介绍了谐波阻抗分析方法。

一个换流站交流侧谐波因交流滤波器投切或故障等原因, 谐波传递到相邻的换流站, 或吸收了相邻换流站传递过来的谐波, 导致相邻换流站相应次数谐波幅值增大或减小, 称为谐波传递现象。换流站交流侧和直流侧之间也存在谐波传递现象, 从一侧传递到另一侧时, 谐波次数会发生变化^[10-11]。谐波电压、谐波电流与基波电压、基波电流一样, 满足基尔霍夫定律、欧姆定律, 需要构成回路^[12-13], 当谐波未被滤波器及时吸收时, 就会沿交流网络传递到其他换流站^[14]。谐波传递可分为谐波吸收、谐波放大或谐波失稳 2 种现象。

1.1 谐波吸收

一换流站交流滤波器的投入引起了相邻换流站谐波含量的减少, 称为谐波吸收现象。交流滤波器的投入首先吸收了本站交流侧的谐波和邻站传递过来的谐波, 本站谐波水平降低后, 邻站的谐波会进一步传递过来, 滤波器再次吸收谐波后, 邻站的谐波含量会明显降低。

1.2 谐波失稳或谐波放大

滤波器投切、直流侧或交流侧故障、运行方式变换等诱发谐波振荡放大以致系统不能正常运行, 称为

收稿日期: 2015-01-11; 修回日期: 2015-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377104)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377104)

谐波失稳现象。本文暂不讨论谐波失稳现象。

谐波放大分 2 种情况:第一种是交直流侧谐波互相作用引起的谐波放大,因交直流侧电压、电流通过换流站非线性环节的互相调制,构成了一个 AC/DC 之间的正反馈闭环,造成谐波放大或失稳^[15-16];第二种是两换流站交流侧谐波互相影响引起的谐波放大。第二种谐波放大又分为 2 种情况:一种是相邻换流站交流滤波器切除后,未吸收的谐波沿交流网络传递到本站,引起本站谐波放大;另一种是相邻换流站交流滤波器投入反而引起本站谐波放大。

本文提到的交流侧电流是指经过交流滤波器滤波后流入交流电网的电流,虽然由于换流器的电流源性质,交流侧输出电流幅度变化不大,但经过交流滤波器后各次谐波大小发生了变化,并进而受交流侧故障或相邻换流站滤波器的投切而继续发生变化。所以,逆变站交流侧电压、电流谐波都可能发生谐波吸收、谐波放大现象。

2 谐波阻抗分析方法

双馈入直流输电系统中, n 次谐波交互影响分析模型如图 1 所示。图中, $I_{S1(n)}$ 、 $I_{S2(n)}$ 为换流器作为谐波源产生的 n 次谐波电流; $I_{M1(n)}$ 、 $I_{M2(n)}$ 为流入等效交流电网的 n 次谐波电流; $I_{X(n)}$ 为从直流 1 交流侧流入直流 2 交流侧的 n 次谐波电流; $U_{1(n)}$ 、 $U_{2(n)}$ 为直流 1、直流 2 交流侧 n 次谐波电压; $Z_{M1(n)}$ 、 $Z_{M2(n)}$ 为直流 1、直流 2 交流电网等效谐波自阻抗; $Z_{X(n)}$ 为直流 1、直流 2 交流电网等效联络谐波阻抗。

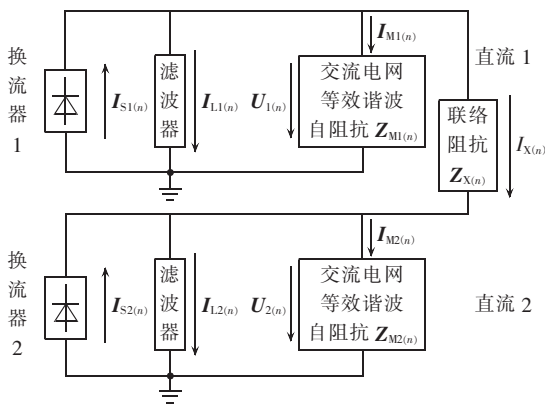


图 1 双馈入直流输电系统谐波交互影响分析模型

Fig.1 Harmonic interaction analysis model of two-infeed HVDC system

由图 1 可得如下 3 个规律。

(1) 当 $U_{1(n)}$ 、 $U_{2(n)}$ 不相等时,联络阻抗 $Z_{X(n)}$ 两端存在电压差, $I_{X(n)}$ 不为 0,即发生了谐波传递现象。假设:

$$I_{X(n)} + I_{M2(n)} = I'_{M2(n)} \quad (1)$$

当 $I_{X(n)}$ 与 $I_{M2(n)}$ 相位相差较小时,如图 2(a)所示, $I'_{M2(n)}$ 相比 $I_{M2(n)}$ 幅值增加,表明直流 2 交流侧 n 次

谐波发生了谐波放大现象。

当 $I_{X(n)}$ 与 $I_{M2(n)}$ 相位相差较大时,如图 2(b)所示, $I'_{M2(n)}$ 相比 $I_{M2(n)}$ 幅值减小,表明直流 2 交流侧 n 次谐波发生了谐波吸收现象。

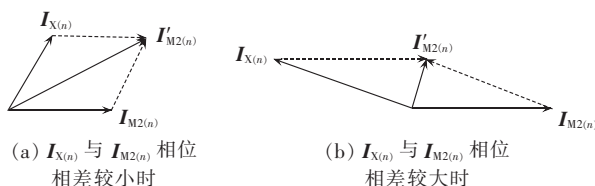


图 2 谐波放大、谐波吸收形成原因示意图

Fig.2 Schematic diagram of harmonic absorption and amplification occurrence

(2) 2 个直流之间谐波影响程度与其等效联络阻抗大小有关。由图 1 可得:

$$U_{1(n)} - U_{2(n)} = Z_{X(n)} I_{X(n)} \quad (2)$$

假设联络阻抗 $Z_{X(n)}$ 两端电压不变,由式(2)可知, $Z_{X(n)}$ 越大,2 条直流之间电气距离越远,则 $I_{X(n)}$ 越小,2 条直流之间的谐波交互影响就小。

(3) 为了简化分析,找出谐波交互影响的一般发生条件,假设两换流站产生的 n 次电流谐波 $I_{S1(n)}$ 、 $I_{S2(n)}$ 相等,因滤波器 n 次谐波阻抗远大于交流电网等效 n 次谐波自阻抗,两者并联计算结果可忽略计入滤波器 n 次谐波阻抗,换流器电流源可转换为电压源表示如下:

$$U_{1(n)} = I_{S1(n)} Z_{M1(n)} \quad (3)$$

$$U_{2(n)} = I_{S2(n)} Z_{M2(n)} \quad (4)$$

由图 1 可得:

$$I_{X(n)} = \frac{U_{1(n)} - U_{2(n)}}{Z_{X(n)}} \quad (5)$$

将式(3)、式(4)代入式(5),并根据

$$I_{S1(n)} = I_{S2(n)} \quad (6)$$

可得:

$$I_{X(n)} = \frac{I_{S1(n)} (Z_{M1(n)} - Z_{M2(n)})}{Z_{X(n)}} \quad (7)$$

设联络阻抗 $Z_{X(n)}$ 为一固定值,则 $I_{X(n)}$ 的大小仅与交流电网等效谐波自阻抗 $Z_{M1(n)}$ 、 $Z_{M2(n)}$ 有关。当 2 个等效谐波自阻抗相等时, $I_{X(n)}$ 为 0。令:

$$\Delta Z = Z_{M1(n)} - Z_{M2(n)} \quad (8)$$

由图 3(a)可见,2 个等效谐波自阻抗相位差值较大时, ΔZ 也相对较大,由式(7)知, $I_{X(n)}$ 也会较大;由图 3(b)可见,2 个等效谐波自阻抗幅值差值较大时, ΔZ 也相对较大,由式(7)知, $I_{X(n)}$ 也会较大。可见,发生明显谐波放大、谐波吸收现象的前提条件是 2 个等效谐波自阻抗幅值差值较大或相位差值较大。

3 谐波交互影响现象仿真及录波数据验证

3.1 仿真模型

利用 EMTDC 电磁暂态仿真软件建立简化的华

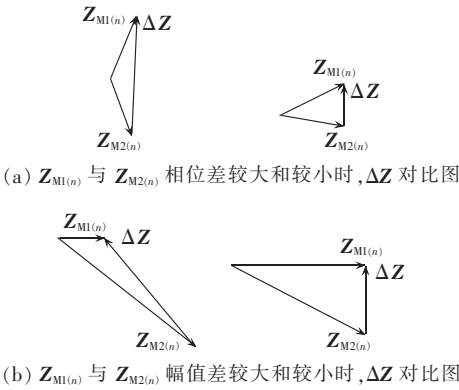


图 3 谐波放大、谐波吸收前提条件示意图

Fig.3 Necessary conditions of harmonic absorption and amplification occurrence

东电网多馈入直流系统仿真模型,如图 4 所示。三峡水电通过龙政直流、宜华直流、葛南直流 3 条直流输送到华东电网。换流器统一采用 12 脉动模型,交流侧特征谐波次数为 $12k \pm 1(k=1,2,\cdots)$ 次^[2]。各逆变站交流侧都配置了电容器组、11 次交流滤波器、13 次交流滤波器、24 次交流滤波器各 1 组。电容器组只用于提供无功功率,不具有滤波作用。

针对图 4 所示的多馈入直流输电系统仿真模型,研究各换流站投切交流滤波器时,各换流站交流侧谐波交互影响情况,总仿真时间 1.5 s。0.8 s 时华新站切除 24 次交流滤波器,政平站投入 13 次交滤波器;1.1 s 南桥站投入 24 次交流滤波器;各站所有其他交流滤波器及电容器一直保持投入状态。3 条直流一直保持满功率运行状态。

3.2 谐波扫描分析

针对图 4 所示的多馈入直流输电系统仿真模型和滤波器投切时间设置,对各换流站交流侧进行了频率扫描分析,各站谐波自阻抗及相角曲线如图 5—7 所示。

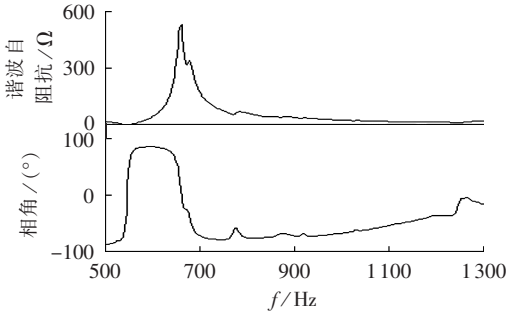


图 5 政平站交流侧谐波自阻抗及相角曲线

Fig.5 Harmonic self-impedance curve and phase curve at AC side of Zhengping Station

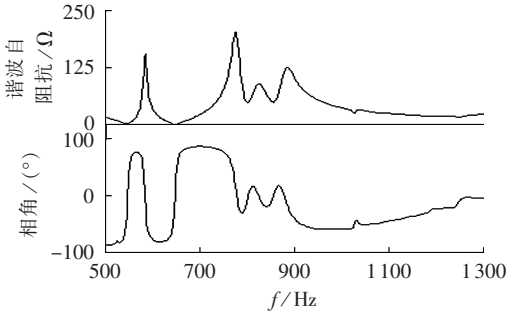


图 6 华新站交流侧谐波自阻抗及相角曲线

Fig.6 Harmonic self-impedance curve and phase curve at AC side of Huaxin Station

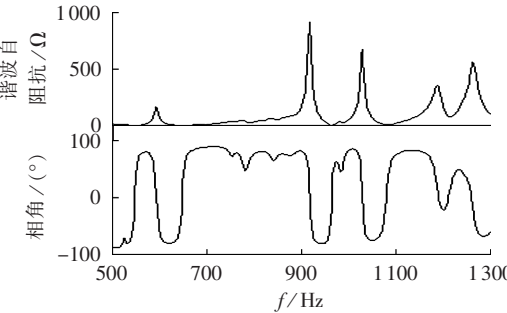


图 7 南桥站交流侧谐波自阻抗及相角曲线

Fig.7 Harmonic self-impedance curve and phase curve at AC side of Nanqiao Station

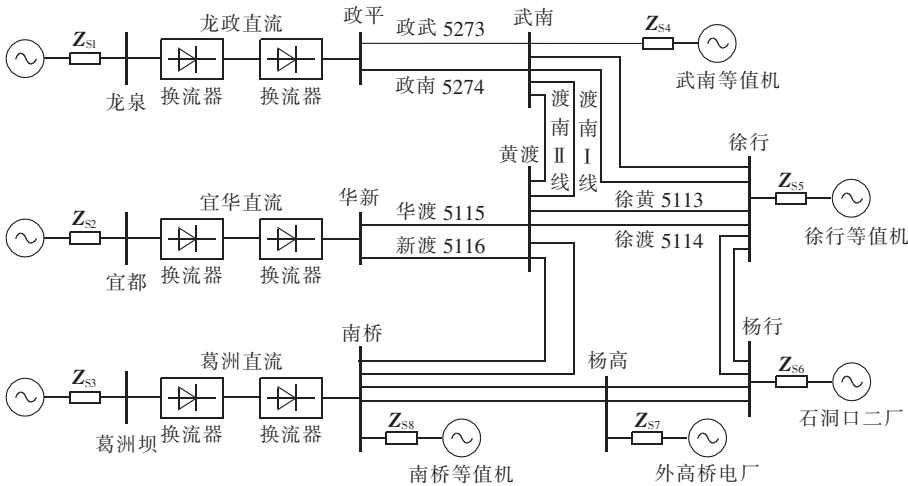


图 4 EMTDC 多馈入直流系统仿真模型

Fig.4 EMTDC simulation model of multi-infeed HVDC system

换流站交流侧一般特征谐波较大,本文选取 13 次和 23 次电压谐波、电流谐波进行分析。根据谐波阻抗分析理论,在谐波阻抗取得极大值、谐波阻抗角由正变负时易发生并联谐振;在谐波阻抗取得极小值、谐波阻抗角由负变正时易发生串联谐振。由图 5—7 可见,各换流站 13 次谐波均满足谐振条件,只有南桥站 23 次谐波靠近谐振点。

由图 5—7 可见,政平站 13 次谐波对应谐波自阻抗约为 $250\ \Omega$,相角约为 75° ;华新站 13 次谐波对应谐波自阻抗约为 $0\ \Omega$,相角约为 -40° ;南桥站 13 次谐波对应谐波自阻抗约为 $0\ \Omega$,相角约为 -50° ;政平站 23 次谐波对应谐波自阻抗约为 $40\ \Omega$,相角约为 -40° ;华新站 23 次谐波对应谐波自阻抗约为 $35\ \Omega$,相角约为 -35° ;南桥站 23 次谐波对应谐波自阻抗约为 $100\ \Omega$,相角约为 75° 。

下文第 3.3、3.4 节将验证第 2 节提出的第 3 个规律。

3.3 谐波吸收现象

华新站交流侧 A 相 13 次电流谐波幅值波形图如图 8 所示(谐波幅值为标么值,后同)。0.8 s 政平站 13 次交流滤波器的投入引起华新站交流侧 13 次电流谐波的大幅减小,这说明政平站吸收了华新站的 13 次电流谐波。1.1 s 南桥站 24 次交流滤波器的投入引起华新站 13 次电流谐波的短时扰动,随后恢复到之前水平。

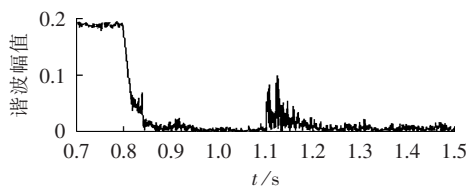


图 8 华新站交流侧 A 相 13 次电流谐波幅值波形图
Fig.8 Waveform of phase-A 13th current harmonic at AC side of Huaxin Station

由第 3.2 节谐波自阻抗数值可知,华新站和政平站 13 次谐波自阻抗相差约 $250\ \Omega$,相角相反,相差约 115° ,满足发生明显谐波吸收的前提条件。

华新站交流侧 A 相 23 次电压谐波幅值波形图如图 9 所示,0.8 s 华新站 24 次交流滤波器切除后,华新站交流侧 23 次电压谐波急剧增加,1.1 s 南桥站 24 次交流滤波器投入后,吸收了大部分 23 次电压谐

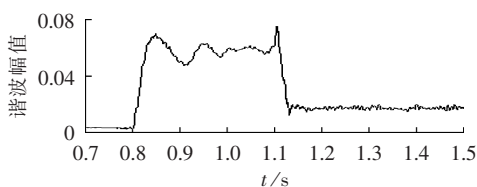


图 9 华新站交流侧 A 相 23 次电压谐波幅值波形图
Fig.9 Waveform of phase-A 23rd voltage harmonic at AC side of Huaxin Station

波,使得华新站交流侧 23 次电压谐波含量恢复到较低水平。

由第 3.2 节谐波自阻抗数值可知,华新站和南桥站 23 次谐波自阻抗相差约 $65\ \Omega$,相角相反,相差约 110° ,满足发生明显谐波吸收的前提条件。

3.4 谐波放大现象

3.4.1 邻站交流滤波器切除引起的谐波放大

南桥站交流侧 A 相 23 次电压、电流谐波幅值波形图如图 10、图 11 所示,仿真表明,0.8 s 华新站 24 次交流滤波器切除后,华新站交流侧 23 次电压和电流谐波快速增加,部分谐波沿交流网络传递到了南桥站,导致南桥站交流侧 23 次电压、电流谐波急剧增加,1.1 s 南桥站投入 24 次交流滤波器后,南桥站交流侧 23 次电压、电流谐波又大幅下降。

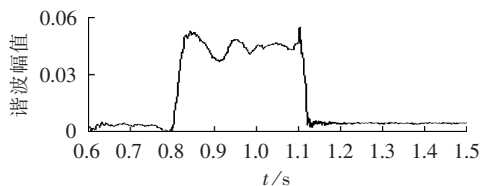


图 10 南桥站交流侧 A 相 23 次电压谐波幅值波形图
Fig.10 Waveform of phase-A 23rd voltage harmonic at AC side of Nanqiao Station

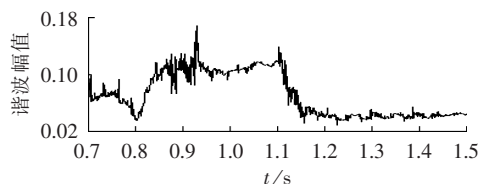


图 11 南桥站交流侧 A 相 23 次电流谐波幅值波形图
Fig.11 Waveform of phase-A 23rd current harmonic at AC side of Nanqiao Station

由第 3.2 节谐波自阻抗数值可知,华新站和南桥站 23 次谐波自阻抗相差约 $65\ \Omega$,相角相反,相差约 110° ,满足发生明显谐波传递的前提条件。

3.4.2 邻站交流滤波器投入引起的谐波放大

华新站交流侧 A 相 23 次电流谐波幅值波形图如图 12 所示。0.8 s 华新站 24 次交流滤波器的切除引起华新站 23 次电流谐波的增加,但 1.1 s 南桥站投入 24 次交流滤波器后,不但没有出现第 3.3 节描述的谐波吸收现象,华新站 23 次电流谐波反而进一步增大,出现了谐波放大现象。

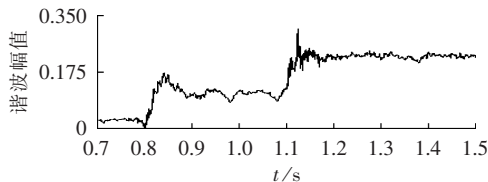


图 12 华新站交流侧 A 相 23 次电流谐波幅值波形图
Fig.12 Waveform of phase-A 23rd current harmonic at AC side of Huaxin Station

由第 3.2 节谐波自阻抗数值可知,南桥站和华新站 23 次谐波自阻抗相差约 $65\ \Omega$,相角相反,相差约 110° ,满足发生明显谐波放大的前提条件。

3.5 录波数据验证

某日,龙政直流满功率运行,交流滤波器、电容器组全部投入,0 s 政平换流站交流线路政武 5273 线 A 相发生瞬时短路故障,0.29 s 政平站 13 次交流滤波器自动切除,与此同时,华新换流站正在进行功率调整,0.41 s 华新站 24 次交流滤波器切除,0.5 s 政平站 13 次交流滤波器自动投入。政平站交流侧政武 5273 线 A 相 23 次电流、电压谐波幅值波形图分别如图 13、图 14 所示。

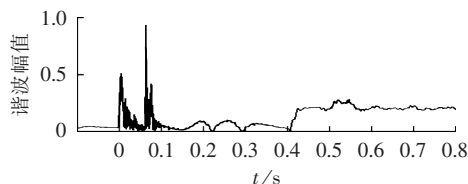


图 13 政平站交流侧 A 相 23 次电流谐波幅值波形图

Fig.13 Waveform of phase-A 23rd current harmonic at AC side of Zhengping Station

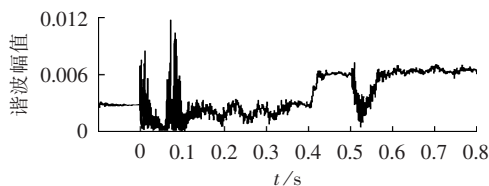


图 14 政平站交流侧 A 相 23 次电压谐波幅值波形图

Fig.14 Waveform of phase-A 23rd voltage harmonic at AC side of Zhengping Station

由图 13 可知,故障发生后,政平站交流侧 A 相 23 次电流谐波瞬时振荡增加,随后振荡幅度减小,0.41 s 华新站切除 24 次交流滤波器后,23 次电流谐波明显增加,0.5 s 政平站 13 次交流滤波器投入短时引起 23 次谐波电流增加,后又恢复原来水平。

由图 14 可知,故障发生后,政平站交流侧 A 相 23 次电压谐波发生瞬时振荡,随后振荡幅度减小,0.41 s 华新站切除 24 次交流滤波器后,23 次电压谐波明显增加,0.5 s 政平站 13 次交流滤波器投入短时引起 23 次电压谐波下降,后又恢复原来水平。

华新站 24 次交流滤波器的切除引起政平站 23 次电流、电压谐波的增加,验证了换流站交流侧存在明显谐波传递现象。

另外,笔者还选取了政平站、华新站、南桥站交流侧故障时的电压、电流录波数据进行分析,并进行了仿真对比。仿真和录波数据都表明,交流侧接地等故障时,交流侧特征谐波、非特征谐波都可能放大,且非特征谐波放大的倍数更大,但非特征谐波受交流滤波器的投切影响较小,变化幅度明显小于特征谐波。这主要是因为非特征谐波滤波器一般不安装

或滤波容量较小,交流侧故障时,谐波未被充分吸收,放大倍数较大;同时非特征谐波受特征谐波滤波器的投切影响也较小,变化幅度相应也较小。

4 结语

本文首先介绍了多馈入直流输电系统中各换流站交流侧存在的谐波吸收、谐波放大现象,建立了双馈入直流输电系统交流侧谐波交互影响分析模型,提出两换流站交流侧等效联络阻抗越小,谐波影响就会越突出;利用谐波阻抗分析方法,揭示了谐波交互影响机理。利用 EMTDC 电磁暂态仿真软件,建立华东电网多馈入直流输电系统简化模型,通过对各换流站交流滤波器组合投切、交流侧故障的仿真和录波数据分析,验证了各换流站之间存在谐波吸收、放大现象,并对各换流站交流侧谐波自阻抗和谐波相角进行了扫描分析,验证了两换流站之间某次谐波发生明显谐波吸收、谐波放大的前提条件是两站交流侧等效谐波自阻抗幅值差值较大或相位差值较大。

参考文献:

- [1] 邵瑶,汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009,33(17):24-30.
SHAO Yao,TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology,2009,33(17):24-30.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京:科学出版社,1998:29-31.
- [3] YANG W D,XU Z. Coordinated hierarchical control strategy for multi-infeed HVDC systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution,2002,149(2):242-248.
- [4] MAO X M,ZHANG Y,GUAN L,et al. Researches on coordinated control strategy for inter-area oscillations in AC/DC hybrid grid with multi-infeed HVDC[C]//Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference 2005,Asia-Pacific. Dalian, China:IEEE,2005:1-6.
- [5] 林凌雪,张尧,钟庆,等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术,2006,30(17):40-45.
LIN Lingxue,ZHANG Yao,ZHONG Qing,et al. A survey on commutation failure in multi-infeed HVDC transmission system[J]. Power System Technology,2006,30(17):40-45.
- [6] 郭利娜,刘天琪,李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):95-99.
GUO Lina,LIU Tianqi,LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):95-99.
- [7] 郝巍,李兴源,金小明,等. 多馈入直流系统中逆变电站滤波器投切对谐波电流的影响[J]. 电网技术,2006,30(19):48-52.
HAO Wei,LI Xingyuan,JIN Xiaoming,et al. Impacts of switching AC filters of inverter stations on harmonic currents in multi-infeed HVDC system[J]. Power System Technology,2006,30(19):48-52.
- [8] 郝巍,李兴源,金晓明,等. 直流输电引起的谐波不稳定及其相关问题[J]. 电力系统自动化,2006,30(19):94-99.

- HAO Wei, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. A survey of harmonic instability and related problem caused by HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 94-99.
- [9] 滕予非, 丁理杰, 汤凡, 等. 基于谐波互阻抗的励磁涌流引发谐波电压畸变风险识别[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 155-161.
- TENG Yufei, DING Lijie, TANG Fan, et al. Risk identification based on harmonic mutual impedance for harmonic voltage distortion caused by excitation inrush current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 155-161.
- [10] BURTON R S, FUCHSHUBER C, WOODFORD D A, et al. Prediction of core saturation instability at an HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 1961-1969.
- [11] HU Lihua, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [12] PETER R. 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.
- [13] WOOD A R, ARRILLAGA J. The frequency dependent impedance of an HVDC converter [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1635-1641.
- [14] LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. A calculation method of harmonic for multi-infeed direct current [C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia Pacific. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [15] XIAO Jiang, GOL E A M. A frequency scanning method for the identification of harmonic instability in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(4): 1875-1881.
- [16] 赵元哲, 李群湛, 周福林. 基于阻波高通滤波器的高速铁路谐波抑制方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 139-144.
- ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin. Resonance suppression based on wave-trap high-pass filter for high-speed railway [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 139-144.

作者简介:



杨光亮

杨光亮(1981—),男,河南周口人,博士研究生,主要研究方向为直流输电控制保护、换流站运行维护(E-mail: yangguang615@sina.com);

邵能灵(1972—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统继电保护教学及科研工作;

郑晓冬(1985—),男,安徽安庆人,博士研究生,主要研究方向为直流输电控制保护。

Harmonic interaction analysis for multi-infeed HVDC system

YANG Guangliang^{1,2}, TAI Nengling^{1,3}, ZHENG Xiaodong¹, YU Zhongan³

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Grid Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450002, China; 3. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Harmonic interaction phenomenon exists at the AC side of every converter station in multi-infeed HVDC system. The definitions of harmonic absorption and amplification at the AC side of multi-infeed HVDC system are presented and their phenomena described. A harmonic interaction analysis model of two-infeed HVDC system is put forward based on the harmonic impedance analysis for revealing the mechanism of harmonic interaction. As an example, an EMTDC simulation model of multi-infeed HVDC system is established for the East China Power Grid. The phenomena of harmonic interaction and its mechanism are verified by the simulation of AC-filter on-off switching and AC-side faults and by the analysis of recorded data. The difference of magnification between non-characteristic harmonic and characteristic harmonic is analytically compared. The scanning analysis of harmonic self-impedance at the AC side of every converter station shows that, greater difference of equivalent AC-side harmonic self-impedance amplitude or phase between two converter stations is the necessary condition of evident harmonic absorption and amplification.

Key words: multi-infeed HVDC; HVDC power transmission; harmonic analysis; harmonic impedance; harmonic transfer; harmonic absorption; harmonic amplification; harmonic interaction