

交直流混合微电网中关于纹波的研究

席晓林¹, 吴杰², 王宁², 闫晓安², 李冬亮², 孙黎明²

(1. 国网冀北电力有限公司智能配电网中心, 河北 秦皇岛 066100; 2. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 考虑交流侧电网中谐波与三相不平衡对纹波的影响以及纹波的叠加, 对交直流混合微电网中的纹波问题进行研究, 提出在 k 次谐波源三相相位角变化时, 其产生的 $k+1$ 次与 $k-1$ 次纹波的幅值彼此消彼长的关系, 对纹波的叠加有影响。证明当同次正序谐波之间、负序谐波之间及相邻次数的正序和负序谐波之间进行叠加时, 谐波的初相位差对叠加纹波幅值的影响具有一定的规律性, 最后, 通过 Matlab/Simulink 建模对研究进行验证。由仿真结果可知, 交直流混合微电网中纹波叠加的幅值与谐波次数及谐波源的初相位差有关。该文研究对混合微电网的电能质量分析和治理具有重大意义。

关键词: 混合微电网; 电能质量; 纹波; 纹波叠加

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.010 中图分类号: TM721.1 文章编号: 1673-9140(2020)06-0076-07

Research on ripple in AC/DC hybrid microgrid

XI Xiaolin¹, WU Jie², WANG Ning², YAN Xiaohan², LI Dongliang², SUN Liming²

(1. Smart Distribution Network Center, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Qinhuangdao 066100, China; 2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: With the consideration of the effect of harmonic and three-phase unbalance on ripple and the superposition of ripple in AC side grid, the ripple problem in AC/DC hybrid micro grid is studied in this paper. Firstly, It is proposed that if the phase angle of the k -order harmonic source changes in its three phases, the amplitude of the $k+1$ and $k-1$ ripple generated by the k th harmonic source is the reciprocal relationship, which has an impact on the superposition of ripple. Then, it is found that the effect of the initial phase difference of harmonics on the amplitude of the superimposed ripple has a certain regularity by superimposing the positive order harmonics of the same number, the negative order harmonics of the same number and the positive order and negative order harmonics of adjacent times. Finally, the above studies are confirmed by Matlab/Simulink modeling. It is shown that the amplitude of ripple superposition in AC-DC hybrid micro grid is related to the harmonic frequency and initial phase difference of harmonic source. The research of this paper is of great significance to the analysis and management of power quality in hybrid micro grid.

Key words: hybrid microgrid; power quality; ripple; ripple superposition

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(51607153)

通信作者: 吴杰(1959-), 男, 教授, 主要从事供电系统电能质量分析与控制的研究; E-mail: wujie590130@163.com

随着电网结构的不断优化,交直流混合微电网的发展成为一种必然趋势^[1-5]。在兼顾交流电网与直流电网优势的同时,交直流混合微电网也存在着独有的电能质量问题。混合微网中存在大量的非线性负荷以及电力电子元器件、换流器等元件,这些元件的应用会造成谐波的产生,这些谐波在逆变器的作用下对交流和直流电网产生了交互影响^[6-7],严重影响了电网的电能质量。

文献[8]研究了柔性直流配电网纹波形成机理与叠加特性,但是该文献只是考虑了相邻的正序与负序谐波叠加,研究过于单一;文献[9]只是研究了交流侧谐波与三相不平衡对纹波产生的影响,并没有研究纹波的叠加情况;文献[10]研究的是逆变器产生的纹波及纹波电流的抑制;文献[11]提出了抑制燃料电池输出侧低频电流纹波的有源控制方法;文献[12]提出两级式单相逆变器输入电流低频纹波分析及抑制;文献[13]研究了直流微电网双向储能变换器的两带通滤波器二次纹波电流抑制与均分控制方法。以上参考文献中指出纹波是由逆变器的开关函数引起的,而并未考虑交流侧谐波和三相不平衡等因素对纹波的影响。因此,该文对交直流混合微电网中的纹波进行研究,研究中的纹波是由交流电网侧非线性负荷产生的谐波和三相不平衡所引起的,反应了混合微电网中交流与直流电网侧之间的相互影响。

首先,该文介绍混合微电网交流侧谐波和三相不平衡对纹波的影响。然后,考虑到各次谐波同时作用时直流侧产生的纹波会在幅值上有叠加效应,故该文着重从谐波的次数和相位差两方面对纹波的叠加进行分析,通过 2 个实验证明谐波相位差对纹波叠加的影响。最后,通过仿真研究得出交直流混合微电网中纹波的叠加幅值与谐波次数、谐波相位有关。该文研究内容对混合微电网电能质量的分析以及纹波的治理有重大意义。

1 纹波的介绍

简单的混合微电网接口如图 1 所示,通过换流

器的连接,交流侧与直流侧可以进行双向能量交换^[14],同时也伴随了纹波的出现。

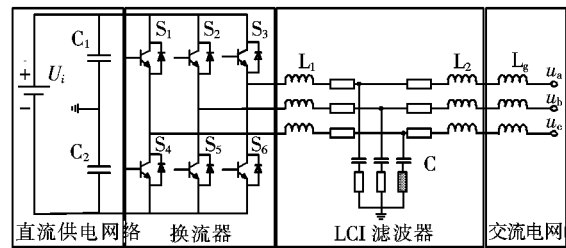


图 1 混合微电网中交流与直流电网接口的拓扑结构

Figure 1 Topology of the interface between AC grid and DC grid in hybrid microgrid

1.1 纹波概念

纹波为恒定的直流量上叠加的交流分量^[15]。该文参考文献[8]中纹波的定量指标来表示直流电网中电压、电流的纹波含量。

1) 纹波含量:

$$Y_k = \frac{W_k}{W_{dc}} \times 100\% \quad (1)$$

式中 W_k 为 k 次纹波的有效值; W_{dc} 为直流电压、电流的额定基准量。

2) k 次电压纹波含量:

$$Y_U = \frac{\sqrt{\sum U_k^2}}{U_{dc}} \times 100\% \quad (2)$$

式中 U_k 为 k 次纹波电压的有效值; U_{dc} 为直流电压额定值。

3) k 次电流纹波含量:

$$Y_I = \frac{\sqrt{\sum I_k^2}}{I_{dc}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 I_k 为第 k 次纹波电流的有效值; I_{dc} 为直流电流额定值。

1.2 纹波的形式

直流电网侧输出电压、电流波形如图 2 所示,当交流侧电网处于理想状态时,直流电网输出的电气量恒定;当交流电网中出现谐波或存在三相不平衡时,直流侧输出的电压、电流除直流分量外,还会出现波动分量。直流侧输出电压、电流通过傅里叶分析后的幅值频谱如图 3 所示,可见输出的直流电压、电流中含有许多非工频分量。

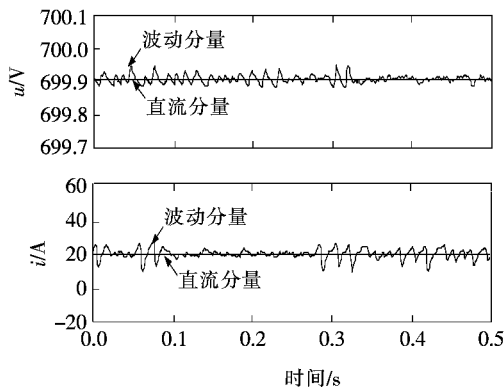


图2 直流电网侧输出电流、电压波形

Figure 2 Waveform diagram of the output voltage and current of the DC grid side

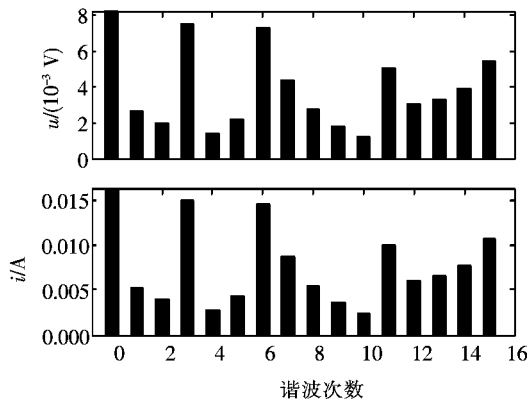


图3 纹波幅值频谱

Figure 3 The spectrum of the ripple amplitude

2 交流侧电网对纹波的影响

交流侧谐波、三相不平衡的存在会造成直流侧出现纹波。

2.1 谐波对纹波的影响

定义开关函数为 S_x , $x = a, b, c$, 则

$$S_x = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂器件导通} \\ -1, & \text{下桥臂器件导通} \end{cases} \quad (4)$$

交流侧与直流侧的电流关系为

$$i_{dc} = \frac{1}{2} \sum S_x i_x \quad (5)$$

低频模型下开关函数为

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $F = U_N/U_z$ 为幅值调制比, U_N 为交流侧额定

电压幅值, U_z 为载波电压幅值。

假设交流系统中含有的 k 次谐波电流为

$$\begin{cases} i_{ka} = I_{ka} \cos(k\omega t + \varphi_{ka}) \\ i_{kb} = I_{kb} \cos[k(\omega t - 2\pi/3) + \varphi_{kb}] \\ i_{kc} = I_{kc} \cos[k(\omega t + 2\pi/3) + \varphi_{kc}] \end{cases} \quad (7)$$

式中 I_{ka} 、 I_{kb} 、 I_{kc} 为三相 k 次谐波电流幅值, A; φ_{ka} 、 φ_{kb} 、 φ_{kc} 为三相 k 次谐波电流相位, rad。则计算出的直流系统中的电流为

$$\begin{aligned} \tilde{i}_{dc} = \frac{1}{4} \{ & FI_{ka} \cos[(k-1)\omega t + \varphi_{ka}] + FI_{ka} \cdot \\ & \cos[(k+1)\omega t + \varphi_{ka}] + FI_{kb} \cos[(k-1) \cdot \\ & \omega t - (k-1)2\pi/3 + \varphi_{kb}] + FI_{kb} \cos[(k+1) \cdot \\ & \omega t - (k+1)2\pi/3 + \varphi_{kb}] + FI_{kc} \cos[(k-1) \cdot \\ & \omega t + (k-1)2\pi/3 + \varphi_{kc}] + FI_{kc} \cos[(k+1) \cdot \\ & \omega t + (k+1)2\pi/3 + \varphi_{kc}] \} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可以看出,当交流中有 k 次谐波时,直流中含有 $(k \pm 1) \cdot f$ 次分量, f 为工频频率。

该文通过 Matlab 仿真向交流中注入 4% 的 6 次谐波来验证交流谐波能够产生纹波,得到直流侧电压、电流的纹波幅值频谱,如图 4 所示,可以看出,当交流侧存在 6 次谐波时,直流侧电压、电流中含有 5 和 7 次频率成分。

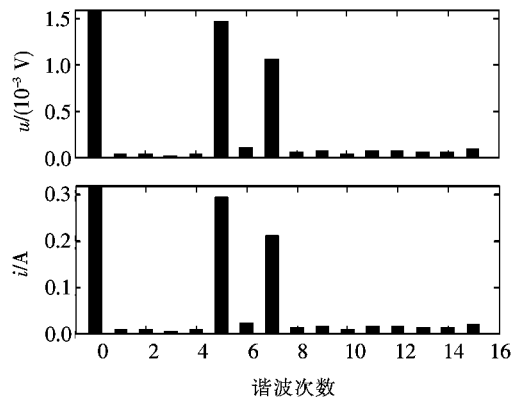


图4 交流侧注入 4% 的 6 次谐波时直流侧电压、电流的纹波幅值频谱

Figure 4 Spectrogram of the ripple amplitude of the DC side voltage and current when the AC side is injected with 4% of the 6th harmonic

2.2 三相不平衡对纹波的影响

电力系统不对称运行时会引起交流电网电流、电压出现三相不平衡,三相不平衡的出现一定程度上影响了直流电气量的输出。该文以三相电流不平

衡为例对纹波的输出状况进行分析。

设 a 相电流为

$$i_a = \sum I_y \cos(\omega t - \varphi_y), y = 0, 1, 2 \quad (9)$$

式中 I_y 、 φ_y 分别为零序、正序、负序电流分量的幅值和相位。可以得出直流侧的电流表达式:

$$i_{dc} = \frac{1}{2}(S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) = \frac{3}{4} F I_1 \cos \varphi_1 + \frac{3}{4} F I_2 \cos(2\omega t - \varphi_2) \quad (10)$$

其中,交流电流三相平衡时无负序分量, $I_2 = 0$, 只输出恒定的电流值。交流电流三相不平衡时有负序分量, $I_2 \neq 0$, 直流输出伴随大量的二倍频分量。该文通过 Matlab 建模来验证交流侧三相不平衡时能够产生纹波,如图 5 所示,可以看出,直流电流中二倍频的含量与其他频次相比较大。

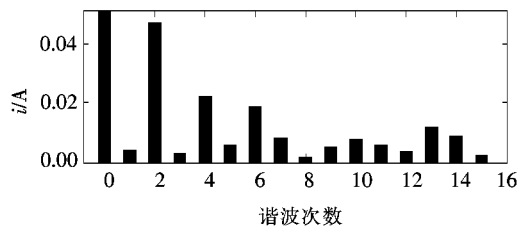


图 5 交流侧三相不平衡时直流电流纹波幅值频谱

Figure 5 Spectrum diagram of DC current ripple amplitude on the AC side three-phase unbalance

3 纹波的叠加

设交流中有 x_{max} 、 x_{min} 次谐波,则

$$k = \begin{cases} 3n - 1, & \text{负序,} \\ 3n, & \text{零序, } n = 1, 2, 3, \dots \\ 3n + 1, & \text{正序,} \end{cases} \quad (11)$$

分析式(11)发现,正序、负序 k 次谐波可以在直流侧分别产生 $k - 1$ 、 $k + 1$ 次纹波,而且对称的正序、负序谐波电流其三相电流的相位互差 120° ,对称的零序谐波电流其三相电流的相位相同。由此可以推断,直流侧谐波的叠加情况与谐波的次数、相位差有关。

3.1 不同谐波次数时纹波的叠加情况

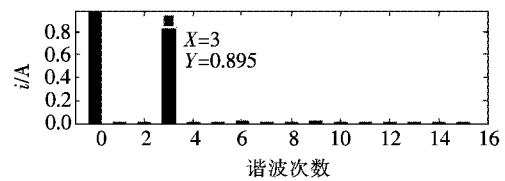
3.1.1 交流侧三相对称情况

为分析交流谐波的存在对直流电网造成的影响,进行参数设置,如表 1 所示,根据表中参数,对直

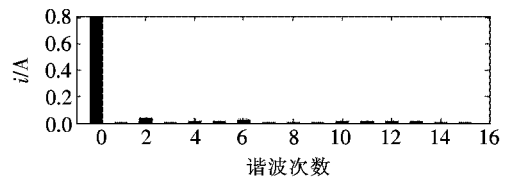
流电网输出纹波进行傅里叶分析。交流电流中分别含有 2、3、4 次谐波时的直流侧电流幅值频谱如图 6 所示,对比可知,交流 2 次谐波只产生 3 次直流纹波,交流 3 次谐波几乎不产生纹波,交流 4 次谐波只产生 3 次直流纹波。3 种谐波同时作用时,产生 3 次直流纹波,并且同时作用时产生纹波的幅值更大。

表 1 对称三相交流谐波参数

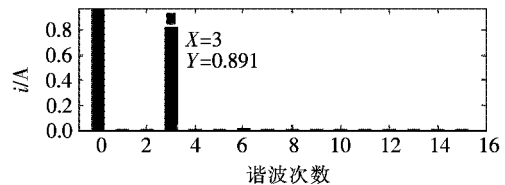
| 谐波 | 幅值/% | 三相谐波初相位/(°) |
|---------|------|-------------|
| 2 次负序谐波 | 3 | 60、180、-60 |
| 3 次零序谐波 | 3 | 30、30、30 |
| 4 次正序谐波 | 3 | 150、30、-90 |



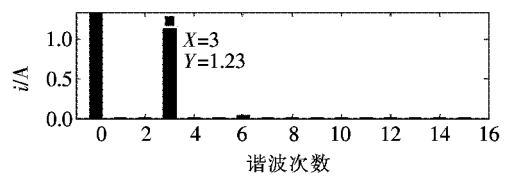
(a) 交流侧电流中含 2 次谐波



(b) 交流侧电流中含 3 次谐波



(c) 交流侧电流中含 4 次谐波



(d) 交流侧电流中含 2、3、4 次谐波

图 6 交流侧三相不平衡时直流侧 3 次纹波频谱

Figure 6 Spectrum diagram of DC 3rd current ripple when the AC side is unbalanced

3.1.2 交流侧三相不对称情况

1) 加强作用。

按照表 2 所示的数据进行仿真,得到的仿真结果如图 7 所示,可以看出,交流 4、6 次谐波都可使直流电网中产生 5 次谐波。交流 4 次谐波作用时可产生幅值为 0.433 的 5 次纹波;交流 6 次谐波作用时

可产生幅值为 0.726 的 5 次纹波;交流 4、6 次谐波共同作用时可产生幅值为 0.962 的 5 次纹波。实验表明,此情况下谐波之间是相互增强的。

2) 削弱作用。

依据表 3 所示的数据进行仿真,得到的仿真结果如图 8 所示,可以看出,交流 3、5 次谐波都可使直流电网产生 4 次谐波。交流 3 次谐波作用时可产生幅值为 0.707 的 4 次纹波;交流 5 次谐波作用时可产生幅值为 0.304 的 4 次纹波;交流 3、5 次谐波共同作用时可产生幅值为 0.425 的 4 次纹波。实验表明,此情况下谐波之间是相互削弱的。

表 2 不对称三相交流谐波参数

Table 2 Asymmetric three-phase AC harmonic parameters

| 谐波 | 幅值/% | 初相位/(°) |
|-------|------|------------|
| 4 次谐波 | 3 | -50,-80,90 |
| 6 次谐波 | 3 | -60,-90,80 |

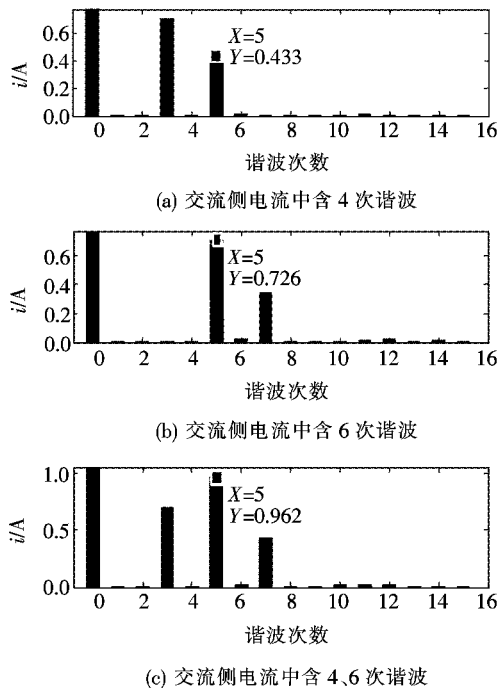


图 7 交流侧三相不平衡时直流侧 5 次纹波频谱

Figure 7 Spectrogram of DC side 5th ripple when AC side three-phase unbalanced

表 3 不对称三相交流谐波参数

Table 3 Asymmetric three-phase AC harmonic parameters

| 谐波 | 幅值/% | 初相位/(°) |
|-------|------|------------|
| 3 次谐波 | 3 | 60,90,-90 |
| 5 次谐波 | 3 | 150,-80,90 |

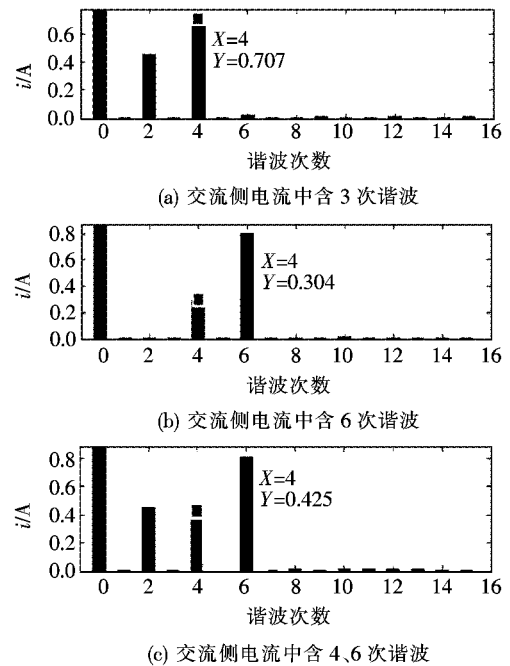


图 8 交流侧三相不平衡时直流侧 4 次纹波频谱

Figure 8 Spectrogram of DC side 4th ripple when AC side three-phase unbalanced

这种相互增强、削弱的现象与交流谐波的初相位有关。

3.2 纹波叠加与相位关系

为研究纹波幅值与谐波初相位之间的关系,该文搭建 Matlab 仿真模型进行验证。

实验 1 单一谐波作用时交流谐波初相位角的变化对纹波幅值的影响(以 3 次谐波为例)。

设 3 次谐波电流中 a 相初相位为 30° , b、c 相初相位从 30° 开始以 $\pi/6$ 为梯度逐渐增加到 360° 。随着 b、c 相电流相位的变化,3 次谐波电流在直流电网中产生的 2、4 次纹波 3 维图形分别如图 9(a)、(b)所示,对比发现,图 9(a)、(b)是左右互补的,即 3 次谐波电流在直流侧产生的 2、4 次纹波的幅值彼此消彼长的,所以纹波幅值与谐波相位角有关。

实验 2 2 种谐波作用时交流谐波初相位变化对纹波幅值的影响(以 3、5 次谐波为例)。

该文进行 3 个仿真:2 组正序 5 次谐波叠加;2 组负序 3 次谐波叠加;正序 5 次、负序 3 次谐波叠加。仿真中一组谐波的初相位为 60° ,另一组谐波的初相位从 30° 开始并以 30° 为梯度逐渐增加到 360° ,谐波幅值均为 3%。

为节省篇幅,该文只列出正序 5 次、负序 3 次谐波叠加的仿真数据,如表 4 所示,其叠加曲线呈现中间凸的形状,如图 10 中的曲线 3 所示(其他 2 组正序、负序谐波的叠加类似)。从图 10 中可以看出,两谐波初相位差的变化会引起纹波叠加幅值的变化。曲线 1、2 的变化规律相同,初相位差为 0° 时叠加幅值最大,初相位差为 180° 时叠加幅值最小。曲线 3 的变化规律与曲线 1、2 相反,初相位差为 0° 时叠加幅值最小,初相位差为 180° 时叠加幅值最大。

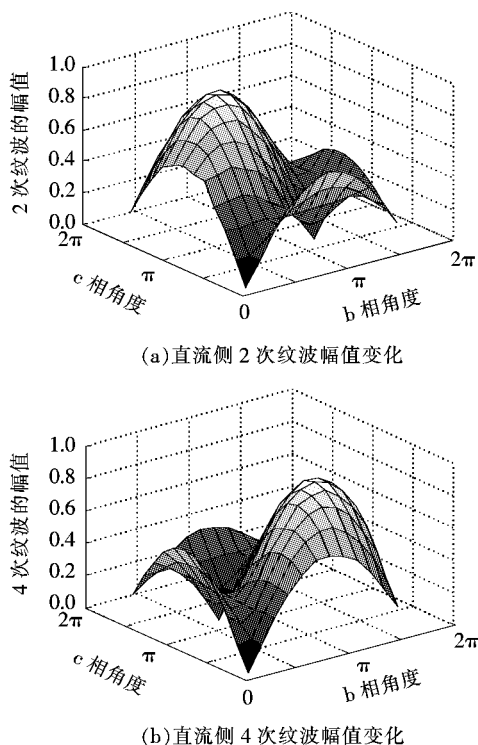


图 9 3 次谐波在直流侧产生的 2、4 次纹波的幅值随交流三相谐波源相位的变化

Figure 9 The amplitude of the 2nd and 4th ripple generated by the 3rd harmonic on the DC side varies with the phase of the AC three-phase harmonic source

表 4 不同相位对叠加结果的影响

Table 4 Effect of different phases on the superposition results

| 谐波相位/ $^\circ$ | | | 谐波相位/ $^\circ$ | | |
|----------------|-----|---------|----------------|-----|--------|
| 5 次 | 3 次 | 纹波幅值/A | 5 次 | 3 次 | 纹波幅值/A |
| 60 | 30 | 0.362 0 | 60 | 210 | 1.389 |
| 60 | 60 | 0.011 5 | 60 | 240 | 1.450 |
| 60 | 90 | 0.390 0 | 60 | 270 | 1.388 |
| 60 | 120 | 0.730 0 | 60 | 300 | 1.239 |
| 60 | 150 | 1.030 0 | 60 | 330 | 1.011 |
| 60 | 180 | 1.270 0 | 60 | 360 | 0.713 |

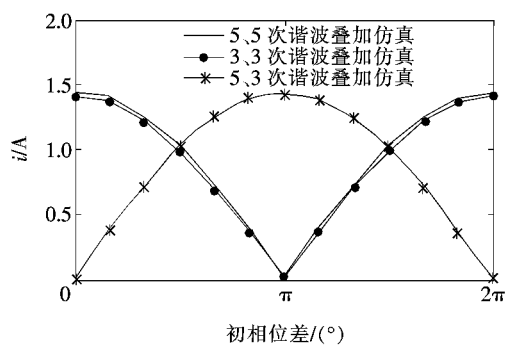


图 10 初相位差对叠加结果的影响

Figure 10 Effect of initial phase difference on the superposition result

4 结语

1) 交直流混合微电网中交流侧和直流侧是相互影响的,交流侧谐波和三相不平衡能够产生纹波。

2) 提出了 k 次谐波源在其三相相位角变化时,所产生的 $k + 1, k - 1$ 次纹波的幅值与此消彼长的关系,对纹波叠加的幅值有影响。

3) 通过仿真实验证实了谐波次数、谐波相位差对纹波的叠加有影响。

参考文献:

[1] 焦皎,孟润泉,任春光,等. 交直流微电网 AC/DC 双向功率变换器控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):84-92.
JIAO Jiao, MENG Runquan, REN Chunguang, et al. Bi-directional AC/DC interlinking converter control strategy for an AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 84-92.

[2] 孟繁庆,易新强,刘海涛,等. 三次谐波注入下多相感应电机稳态性能分析[J]. 电工技术学报,2020,35(16):3396-3405.
MENG Fanqing YI Xinqiang LIU Haitao, et al. Steady-state performance analysis of multiphase induction motor with third-order harmonic injection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3396-3405.

[3] 张明,马洲俊,王勇,等. 基于换流器 π 型等效模型的交直流混合配电网潮流计算[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(2):30-45.
ZHANG Ming, MA Zhoujun, WANG Yong, et al.

- Power flow calculation of AC/DC hybrid distribution network based on equivalent π -model of converter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 30-45.
- [4] 朱永强,王甜婧. 交直流混合微电网网络坚强度评估的指标体系及方法[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 455-463.
ZHU Yongqiang, WANG Tianjing. Index system and method for evaluating strength of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 455-463.
- [5] 李振华,沈聚慧,李红斌,等. 电子式电流互感器测试技术研究现状分析[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(2): 23-30.
LI Zhenhua, SHEN Juhui, LI Hongbin, et al. Review of research situation of testing technology for electronic current transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(2): 23-30.
- [6] 张贵涛,龚芬,王丽晔,等. 光伏并网逆变器电能质量控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4): 50-56.
ZHANG Guitao, GONG Fen, WANG Liyan, et al. Power quality control strategy of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 50-56.
- [7] 肖安南,张蔚翔,张超,等. 需求侧响应下的微网源一网一荷互动优化运行[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 71-79.
XIAO Annan, ZHANG Weixiang, ZHANG Chao, et al. Optimal interactive operation of microgrid under demand response[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 71-79.
- [8] 焦晋荣,贾清泉,王宁,等. 柔性直流配电网纹波形成机理与叠加特性[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1726-1733.
JIAO Jinrong, JIA Qingquan, WANG Ning, et al. Ripple formation mechanism and superimposition characteristics for flexible DC distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1726-1733.
- [9] 吴杰,赵丽霞,贾清泉,等. 逆变器交直流侧谐波交互影响分析[J]. 电气应用, 2017, 36(18): 68-73.
WU Jie, ZHAO Lixia, JIA Qingquan, et al. Harmonic interaction analysis for the inverter DC and AC side[J]. Electrotechnical Application, 2017, 36(18): 68-73.
- [10] 刘席洋,王增平,乔鑫,等. 交直流混联电网换相失败分类及抑制措施研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 1-8.
LIU Xiyang, WANG Zengping, QIAO Xin, et al. Review on classification and mitigation measures of commutation failures in AC-DC hybrid power grids[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 1-8.
- [11] 朱国荣,王浩然,肖程元,等. 抑制燃料电池单相逆变系统低频纹波的波形控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2936-2943.
ZHU Guorong, WANG Haoran, XIAO Chengyuan, et al. Waveform control method for mitigation the low-frequency current ripple in the fuel cell single phase inverter system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2936-2943.
- [12] 王建华,卢旭倩,张方华,等. 两级式单相逆变器输入电流低频纹波分析及抑制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 10-16.
WANG Jianhua, LU Xuqian, ZHANG Fanghua, et al. Low frequency input current ripple analysis and reduction in a single phase inverter with two-stage structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6): 10-16.
- [13] 杨苓,罗安,陈燕东,等. 直流微电网双向储能变换器的两带通滤波器二次纹波电流抑制与均分控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1613-1624.
YANG Ling, LUO An, CHEN Yandong, et al. The second harmonic current suppressed by two band-pass filters and current sharing control method of bi-directional energy storage converters in DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1613-1624.
- [14] 陈新,张旻,王赟程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4559-4567.
CHEN Xin, ZHANG Yan, WANG Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4559-4567.
- [15] 苑宾,梅念,乐波,等. 利用直流断路器实现柔直换流器直流侧在线并网[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 81-96.
YUAN Bin, MEI Nian, YUE Bo, et al. The online connection of MMC to DC-grid based on DC breaker[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 81-96.