

交直流并联输电系统的间谐波研究

余涛, 史军, 任震

(华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640)

Interharmonic in AC/DC Hybrid Transmission System

YU Tao, SHI Jun, REN Zhen

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In view of the fact that, in AC/DC hybrid transmission system, most studies on interharmonic are focused on the detection but lack of its generation mechanism and applied modeling. In this paper the performance of interharmonic in AC/DC hybrid transmission system has been studied by using the modulation theory under three different conditions: normal operation, low frequency oscillation and containing distorted supply sources. At the same time, the generation mechanism and the interaction process of interharmonic in AC and DC networks are analyzed, and a mathematic model about the interharmonics generated in AC and DC side is created. A simulation case for a typical AC/DC hybrid transmission system in steady state is given in the paper. And the comparisons are made with the calculated results, which demonstrate that the proposed analysis model is valid and accurate and provides a theoretical basis for the interharmonic measurement and suppression.

KEY WORDS: AC/DC hybrid transmission system; interharmonic; low frequency oscillation; multi-harmonic sources; modulation theory

摘要: 针对国内对交直流并联输电系统中谐波研究多侧重于检测而缺少对其产生机理及应用建模进行研究的现状, 运用谐波调制理论, 在交直流并联输电系统下, 分析和比较系统在正常运行方式下, 交流系统发生低频振荡及交流系统含有谐波源 3 种情况下, 交直流并联输电系统产生间谐波的不同情况。同时分析和研究间谐波产生的机理, 及其传递行为和相互影响, 并提出间谐波产生的数学模型。最后基于 Matlab/Simulink 软件环境下通过一个典型交直流输电系统数字仿真和所推导数学模型的计算结果进行对比验证, 实证该数学模型的正确性和有效性, 为间谐波的测量和间谐波的治理提供理论依据。

关键词: 交直流并联输电系统; 间谐波; 低频振荡; 多谐波源; 调制理论

0 引言

交直流并联输电系统的多谐波源问题是一个全新的理论问题^[1]。随着越来越多的高压直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 系统投入运行, 我国已形成复杂的大规模交直流并联输电系统, 交直流之间谐波的相互作用将变得异常复杂, 多个换流站产生的谐波能通过交流输电线路相互影响, 形成复杂的多谐波源系统, 不仅产生通常 HVDC 系统的特征谐波、非特征谐波, 还会产生间谐波。

间谐波是非整数倍基波频率的谐波, 电力系统间谐波问题已引起国内外广泛关注^[2-6]。间谐波频率接近某次谐波或基波频率时, 会引起系统信号的闪变(闪烁); 间谐波因改变电压过零点而易使采样数据过零工作的数字继电器产生误差, 甚至误操作造成事故; 还会对电动机的噪声和振动产生很大影响, 而且可能在输电线路中造成特定的电磁振荡, 威胁电网的安全运行。国内对间谐波研究方面的文献资料多侧重于如何准确地检测信号中的间谐波频率分量^[7-12], 对间谐波产生的机理及其应用建模的分析却较少。

目前国内外对交直流输电系统谐波分析方法在处理多谐波源问题方面均有明显不足之处。文献[13]提出了一种计算 HVDC 系统谐波和间谐波的方法, 但只局限于 HVDC 系统, 且 DC 侧为低阻抗的情况; 文献[14]提出用直接法计算 AC 侧谐波和间谐波, 但也局限于 HVDC 系统下; 文献[1]将调制理论和迭代谐波分析法(iterative harmonic analysis, IHA)相结合, 提出一种适用于交直流并联输电系统多谐波源分析的方法(modulation and iterative harmonic analysis, MIHA), 但只计及系统中的特征谐波, 没有考虑间

基金项目: 国家自然科学基金项目(50337010); 广东省自然科学基金博士启动基金项目(06300091)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50337010).

谐波，且无法解决谐波及间谐波产生机理问题。

本文运用谐波调制理论，并结合开关函数的傅里叶分析，研究交直流并联输电系统正常运行方式下，交流系统发生低频振荡及交流系统含有谐波源 3 种情况下产生间谐波的机理、传递行为及其相互影响的问题，并推出间谐波产生的数学模型，最后基于 Matlab/Simulink 软件环境下运用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对仿真结果进行间谐波频谱分析，分析结果和所推导数学模型的计算结果进行对比，实证该模型的正确性和有效性。

1 理想供电电源情况

1.1 直流侧电压

运用调制理论计算交直流并联输电系统直流侧的电压，交直流并联输电系统的电路结构见图 1。

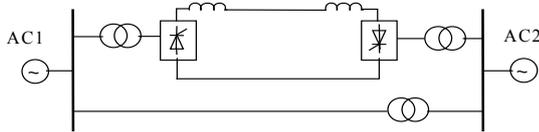


图 1 交直流并联输电系统结构

Fig. 1 AC/DC hybrid transmission system model

调制理论是一种能描述谐波产生机理、谐波传递行为的方法。基本原理是将换流器看成是连接交流和直流系统的一个非线性调制开关电路。通过调制开关函数能将交直流系统中的电压和电流灵活转换，同时开关函数又能表示成傅里叶级数形式。

对于高压直流输电系统中的任何换流器，电压电流的输出和输入关系都可简单表示为电压调制关系式^[15]：

$$u_{DC} = u_a \cdot S_{ua} + u_b \cdot S_{ub} + u_c \cdot S_{uc} \quad (1)$$

式中： u_{DC} 为直流电压； u_a 、 u_b 、 u_c 分别为换流变压器阀侧的供电交流电压； S_{ua} 、 S_{ub} 、 S_{uc} 表示换流器每一相的电压开关函数。

在现代高压直流输电系统中，换流站普遍采用等间隔触发方式。基于该理论，在谐波分析时，就可将换流站的电压电流调制的开关函数写成较规范的幅值为 1 的傅里叶级数形式。对于 6 脉波换流器，电压调制函数可表示为

$$\begin{cases} S_{ua} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} (C_1 \cos \omega t - \frac{C_5}{5} \cos 5\omega t + \frac{C_7}{7} \cos 7\omega t - \frac{C_{11}}{11} \cos 11\omega t + \dots) \\ S_{ub}(\omega t) = S_{ua}(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ S_{uc}(\omega t) = S_{ua}(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{cases} \quad (2)$$

式中 C_1 、 C_5 、 C_7 等为开关函数的系数，当忽略重叠角 μ 时，各系数的取值为 1。当不能忽略重叠角 μ 时，各系数为

$$C_{hu} = \cos \frac{h\mu}{2} \quad (3)$$

式中 $h = 1, 6k \pm 1 (k = 1, 2, 3, \dots)$ 。

若交流系统供电电源为理想的三相对称电压源，变压器也为理想变压器，不在交流系统产生畸变谐波，即

$$\begin{cases} U_a = U_m \cos(\omega t) \\ U_b = U_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ U_c = U_m \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

则根据式(1)、(4)得到直流侧的电压为

$$U_{DC} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} U_m (C_1 - \frac{C_5}{5} \cos 6\omega t + \frac{C_7}{7} \cos 6\omega t - \frac{C_{11}}{11} \cos 12\omega t + \frac{C_{13}}{13} \cos 12\omega t + \dots) \quad (5)$$

从式(5)可看出，在理想电源下，直流侧的电压只出现所熟悉的 6k次特征谐波。若考虑延迟角和重叠角的影响，也可得到类似的公式，但谐波次数不变^[13]。

1.2 直流侧电流

计算直流侧电压之后可根据线路的阻抗和换流器等效阻抗计算得到直流侧电流。为确保谐波计算的准确性，须考虑换流器直流侧的等效阻抗时变特性。将换流器等效成一个非线性时变阻抗，应用傅里叶分析法，该时变阻抗的表达式为^[13]

$$Z_c = Z_{AC} [(2 - \frac{3\mu}{2\pi}) - \sum_{n=1}^{\infty} (1/n\pi) \sin(3n\mu) \cos(6n\omega t)] = Z_{co} - Z_{AC} M_z \quad (6)$$

式中： Z_{AC} 为换流器交流侧每相阻抗； Z_{co} 为常数； M_z 为随重叠角变化的调制函数。则直流侧电流的求解公式为

$$i_{DC} = \frac{U_{DC1} - U_{DC2}}{Z_{c1} + Z_L + Z_{c2}} = \frac{U_{DC1} - U_{DC2}}{Z_{co1} + Z_L + Z_{co2} - (Z_{AC1} M_{z1} + Z_{AC2} M_{z2})} \quad (7)$$

式中 Z_L 为线路等效阻抗值，其等效的电路如图 2(a)所示。直接用式(7)进行计算比较困难，可将式(7)稍作变形，得到

$$i_{DC} = \frac{U_{DC1} - U_{DC2} + i_{DC} (Z_{AC1} M_{z1} + Z_{AC2} M_{z2})}{Z_{co1} + Z_L + Z_{co2}} \quad (8)$$

由式(8)可用迭代的方法求解直流侧电流 i_{DC} ，作变换后的公式其等效电路可看作图 2(b)所示形

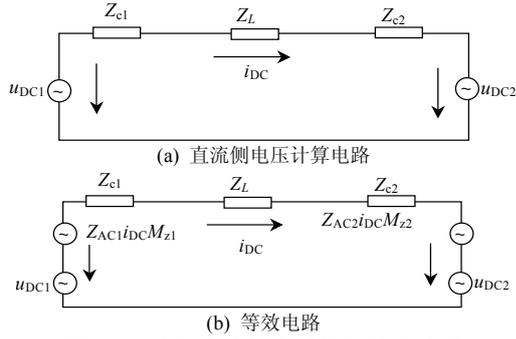


图2 6脉波直流输电系统等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuits for 6-pulse HVDC system

式。其中 $Z_{AC1}i_{DC}M_{z1}$ 和 $Z_{AC2}i_{DC}M_{z2}$ 看作2个等效的电压单元。

假设直流侧电流的一般形式为

$$i_{DC} = I_{d0} + \sum_{m=1}^{\infty} I_{dm} \cos(\omega_m t + \phi_m) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)右边部分,可求得其中 $Z_{AC1}i_{DC}M_{z1}$ 和 $Z_{AC2}i_{DC}M_{z2}$ 的值, $Z_{AC1}i_{DC}M_{z1}$ 为

$$Z_{AC1}i_{DC}M_{z1} = Z_{AC1}I_{d0}M_{z1} + Z_{AC1} \sum_{m=1}^{\infty} I_{dm} \cos(\omega_m t + \phi_m) M_{z1} \quad (10)$$

将式(6)代入式(10),展开得

$$Z_{AC1}i_{DC}M_{z1} = \frac{Z_{AC1}I_{d0}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (1/n) \sin(3n\mu_1) \cos(6n\omega_1 t) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} U_{dm} \{ \cos[(6n\omega_1 + \omega_m)t + \phi_m + \psi_m] + \cos[(6n\omega_1 - \omega_m)t + \phi_m - \psi_m] \} \quad (11)$$

式中: $U_{dm} = \frac{|Z_{AC1}(\omega_m)| I_{dm} \sin(3n\mu_1)}{2n\pi}$; ω_1 为交流系统AC1侧的角频率; ψ_m 为 Z_{AC1} 的阻抗角,从式(11)可看到,直流侧电流 i_{DC} 的计算结果中将会出现2组谐波,频率分别为 $6n\omega_1$ 和 $6n\omega_1 \pm \omega_m$ 。

频率为 $\omega_{DC}=6n\omega_1$ 的谐波为特征谐波电流,在前面的直流侧电压计算中也出现过;而对于 $\omega_{DC}=6n\omega_1 \pm \omega_m$ 的谐波,将从产生 ω_m 的原因分为以下3种情况考虑(其中 m, n, k, p 都为整数):

(1) $\omega_m=6m\omega_1$ 。此时的 ω_m 是由整流侧的交流系统AC1引起的特征谐波,那么此时有

$$\omega_{DC}=6n\omega_1 \pm 6m\omega_1 = 6k\omega_1 \quad (12)$$

(2) $\omega_m=6m\omega_2$ 。此时的 ω_m 是由逆变侧的交流系统AC2引起的特征谐波。当 ω_2 和 ω_1 相等时,即2个交流系统的运行频率严格一致时,整个系统处于正常运行状态时,也就是式(12)的结果,只产生特征谐波,不产生间谐波;当2个交流系统发生低频振荡时, ω_2 和 ω_1 不再严格相等,设: $\omega_2=\omega_1+\Delta\omega$,

则 $\omega_m=6m(\omega_1+\Delta\omega)$,此时有

$$\omega_{DC}=6n\omega_1 \pm 6m(\omega_1+\Delta\omega) = 6k\omega_1 + 6m\Delta\omega \quad (13)$$

这是一组由于2交流系统发生低频振荡造成频率不相等而新产生的间谐波,其频率为 $6k\omega_1 + 6m\Delta\omega$ 。

(3) $\omega_m=6k\omega_1+6m\Delta\omega$ 。此时的 ω_m 是由式(13)产生的间谐波。那么此时有

$$\omega_{DC}=6n\omega_1 \pm (6k\omega_1 + 6m\Delta\omega) = 6p\omega_1 \pm 6m\Delta\omega \quad (14)$$

式(14)和式(13)的形式一样,也就是说,某个频率的间谐波,也产生同样频率的间谐波电流。同理可证,此种情况下 $Z_{AC2}i_{DC}M_{z2}$ 也会产生同样频率的一组间谐波。

1.3 交流侧电流

通过1.2节计算得到直流侧的电流,可通过电流调制函数分别反求得各交流侧的交流电流:

$$\begin{cases} i_a = i_{DC} \cdot S_{ia} \\ i_b = i_{DC} \cdot S_{ib} \\ i_c = i_{DC} \cdot S_{ic} \end{cases} \quad (15)$$

其中电流调制的开关函数的傅里叶级数为^[5]

$$\begin{cases} S_{ia} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} [D_1 \cos(\omega t + \tau_1) - D_5 \cos(5\omega t + \tau_5) + D_7 \cos(7\omega t + \tau_7) + \dots] \\ S_{ib} = S_{ia}(\omega t - 2\pi/3) \\ S_{ic} = S_{ia}(\omega t - 4\pi/3) \end{cases} \quad (16)$$

式中 D_n 和 τ_n 是各次对应谐波的系数和相角。以A相为例,由式(9)、(15)得到交流侧电流为

$$i_a = I_{d0} S_{ia} + \sum_{m=1}^{\infty} I_{dm} \cos(\omega_m t + \phi_m) S_{ia} = \frac{2\sqrt{3}I_{d0}}{\pi} [D_1 \cos(\omega_1 t + \tau_1) - D_5 \cos(5\omega_1 t + \tau_5) + D_7 \cos(7\omega_1 t + \tau_7) + \dots] + \sum_{m=1}^{\infty} (\sqrt{3}I_{dm} / \pi) \cdot \{ D_1 [\cos((\omega_m + \omega_1)t + \tau_1 + \phi_m) + \cos((\omega_m - \omega_1)t - \tau_1 + \phi_m)] - D_5 [\cos((\omega_m + 5\omega_1)t + \tau_5 + \phi_m) + \cos((\omega_m - 5\omega_1)t - \tau_5 + \phi_m)] + D_7 [\cos((\omega_m + 7\omega_1)t + \tau_7 + \phi_m) + \cos((\omega_m - 7\omega_1)t - \tau_7 + \phi_m)] + \dots \} \quad (17)$$

从式(17)可看出,其第1部分是频率为 $\omega_{AC}=(6n\pm 1)\omega_1$ 的特征谐波;第2部分的频率为 $\omega_{AC}=\omega_m \pm (6n\pm 1)\omega_1$,同样分为以下3种情况考虑:

(1) $\omega_m=6m\omega_1$ 。此时的 ω_m 是由整流侧的交流系统AC1引起的特征谐波,那么此时有

$$\omega_{AC}=6m\omega_1\pm(6n\pm 1)\omega_1=(6k\pm 1)\omega_1 \quad (18)$$

式中 $m、n、k、p$ 都为整数。此时所产生的谐波频率和式(17)的第 1 部分相当。

(2) $\omega_m=6m\omega_2$ 。此时的 ω_m 是由逆变侧的交流系统 AC2 引起的特征谐波。同样,当 ω_2 和 ω_1 相等时,即 2 个交流系统的运行频率严格一致时,整个系统处于正常运行状态时,也就是式(18)的结果,只产生特征谐波,不产生间谐波;当 2 个交流系统发生低频振荡时, ω_2 和 ω_1 不再严格相等,设 $\omega_2=\omega_1+\Delta\omega$, 则 $\omega_m=6m(\omega_1+\Delta\omega)$, 此时有

$$\omega_{AC}=6m(\omega_1+\Delta\omega)\pm(6n\pm 1)\omega_1=6m\Delta\omega+(6k\pm 1)\omega_1 \quad (19)$$

这是一组由于 2 交流系统发生低频振荡造成频率不相等而新产生的间谐波,其频率为 $6m\Delta\omega+(6k\pm 1)\omega_1$ 。

(3) $\omega_m=6k\omega_1+6m\Delta\omega$ 。此时的 ω_m 是由式(13)产生的间谐波。那么此时有

$$\omega_{AC}=(6k\omega_1+6m\Delta\omega)\pm(6n\pm 1)\omega_1=6m\Delta\omega+(6p\pm 1)\omega_1 \quad (20)$$

式(20)和式(19)的形式一样,都产生同样的谐波。

2 供电电源含谐波的情况

由于交直流并联输电系统有交流系统的存在,由于变压器及某些负荷的非线性特征,会在系统中产生一定量的畸变谐波,使系统处于非理想的供电电源下工作。

此时,假设三相电源仍然对称,交流系统的电源端三相电压为

$$\begin{cases} U_a = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cos(\omega_i t) \\ U_b = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ U_c = \sum_{i=1}^{\infty} U_i \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (21)$$

则根据式(1)、(21)得到直流侧的电压为

$$U_{DC} = \frac{\sqrt{3}U_i}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} [C_1 \cos(\omega - \omega_i)t - \frac{C_5}{5} \cos(5\omega + \omega_i)t + \frac{C_7}{7} \cos(7\omega - \omega_i)t - \frac{C_{11}}{11} \cos(11\omega + \omega_i)t + \frac{C_{13}}{13} \cos(13\omega - \omega_i)t + \dots] \quad (22)$$

从式(22)可看出,在非理想电源下,直流侧的电压将出现 $(6k\pm 1)\omega_1\pm\omega_i$ 次间谐波,其中 $\omega_i(i=1,2,3\dots)$ 为交流系统第 i 次谐波频率(不一定是基频的 i 倍), k 为整数。

此时,根据式(8)可知,直流侧电流除了产生 1.2 节讨论的谐波之外,还将产生次 $(6k\pm 1)\omega_1\pm\omega_i$ 间谐波电流。

最后由直流侧电流计算交流侧电流时,同样按 1.3 节分析,当 $\omega_m=(6k\pm 1)\omega_1\pm\omega_i$ 时,有

$$\omega_{AC}=(6k\pm 1)\omega_1\pm\omega_i\pm(6n\pm 1)\omega_1=2p\omega_1\pm\omega_i \quad (23)$$

这是一组新的间谐波,其频率为 $2p\omega_1\pm\omega_i$ 。表 1、2 为交直流并联输电系统产生间谐波的情况,仅列出 6 脉波的情况,对于 12 脉波的系统采用相应的调制函数^[16]可得到相应的结果^[17-18]。

表 1 理想供电电源下交直流并联系统
整流侧产生间谐波的频率情况

Tab. 1 Interharmonic in AC/DC hybrid system under ideal supply sources

状态	直流电压	直流电流	交流电流	Hz
正常运行	—	—	—	
低频振荡	—	$6k\omega_1+6m\Delta\omega$	$6m\Delta\omega+(6k\pm 1)\omega_1$	

表 2 供电电源含谐波时交直流并联系统
整流侧产生间谐波的频率情况

Tab. 2 Interharmonic in AC/DC hybrid system with distorted supply sources

状态	直流电压	直流电流	交流电流
正常运行	$(6k\pm 1)\omega_1\pm\omega_i$	$(6k\pm 1)\omega_1\pm\omega_i$	$2p\omega_1\pm\omega_i$

3 仿真分析

为验证上述分析的正确性,本文采用文献[1]的交流 and 单极双桥 12 脉波直流并联输电系统为例(系统参数与文献[1]同),基于 Matlab/Simulink 软件环境下,采用电力电子详细器件模型进行 3 个时域仿真实验,仿真时间统一取 10 s,从 0.6 s 开始,改变时间窗长度来作 FFT 分析;同时,结合计算机程序,对本文所提间谐波产生的数学模型进行计算,然后将计算结果和仿真结果进行分析比较。

(1) 第 1 个仿真实验采用的 2 个交流系统的频率都为 50 Hz,然后采用 FFT 通过改变时间窗的大小来分析记录频率较低含量较大的间谐波;其分析结果如表 3 所示。

(2) 第 2 个仿真实验是交直流并联输电系统发生低频振荡^[19-20],整流侧的交流系统频率为 49 Hz,逆变侧为 51 Hz,同样分析间谐波含量(都是相对基波 50 Hz 的百分含量);2 个仿真实验的供电电源都为理想状态,其分析结果如表 4 所示。

(3) 第 3 个仿真实验的 2 个交流系统频率都为 50 Hz,让整流侧的供电电源含有 20 Hz 的间谐波,幅值为基波的 10%,仿真结果及计算结果见表 5。

表3 理想电源下系统正常运行时的部分间谐波比较
Tab. 3 Results comparison of interharmonic under normal condition with ideal supply sources

频率/Hz	整流侧直流电压间谐波含有率/%		整流侧直流电流间谐波含有率/%		整流侧交流电流间谐波含有率/%	
	计算	仿真	计算	仿真	计算	仿真
	2	0.02	0.10	12.00	13.37	0.08
24	0.25	0.39	0.29	0.33	0.10	0.18
48	0.07	0.09	0.04	0.09	7.06	7.49
72	0.11	0.19	0.14	0.19	0.19	0.27
96	0.04	0.06	0.10	0.23	0.09	0.11
120	0.00	0.02	0.02	0.04	0.17	0.19
168	0.01	0.03	0.02	0.02	0.07	0.09
216	0.00	0.01	0.01	0.01	0.15	0.15
240	0.01	0.01	0.04	0.04	0.07	0.09
276	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03
324	0.28	0.32	0.09	0.14	0.03	0.03
574	0.01	0.03	0.01	0.03	0.06	0.07
674	0.01	0.01	0.01	0.00	0.08	0.11
1 176	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.06
1 224	0.01	0.02	0.00	0.01	0.03	0.04

从表3中数据可看出,按本文所推数学模型计算的间谐波含量和仿真结果基本符合,交直流并联输电系统中在正常运行情况下,并且供电电源是理想条件下时间谐波的含有率都较低,而且总趋势是随频率增大在逐渐减小;由于FFT存在栅栏效应和频谱泄漏,造成一定的误差,以至第1个仿真实验中整流侧的直流电压、电流及交流电流中都有少量的间谐波生成。

表4 理想电源下系统低频振荡时的部分间谐波比较
Tab. 4 Results comparison of interharmonic under low-frequency oscillation

频率/Hz	整流侧直流电压间谐波含有率/%		整流侧直流电流间谐波含有率/%		整流侧交流电流间谐波含有率/%	
	计算	仿真	计算	仿真	计算	仿真
	2	2.38	3.18	17.11	18.93	1.32
48	0.02	0.05	0.08	0.13	94.32	106.6
72	0.11	0.14	0.13	0.14	4.08	5.79
96	0.06	0.08	0.18	0.24	2.72	3.02
120	0.02	0.03	0.05	0.07	2.00	2.06
168	0.02	0.06	0.00	0.03	1.18	1.34
192	0.07	0.12	0.07	0.09	1.09	1.12
216	0.02	0.02	0.02	0.04	0.99	1.09
240	0.04	0.04	0.03	0.04	1.10	1.16
276	0.01	0.01	0.01	0.01	0.88	0.91
324	0.04	0.06	0.02	0.03	0.31	0.61
574	0.04	0.07	0.04	0.08	5.99	6.92
674	0.02	0.03	0.08	0.10	7.51	8.21
1 176	0.13	0.18	0.03	0.06	0.21	0.23
1 124	0.12	0.13	0.02	0.02	0.18	0.18

从表4可看出,整流侧的直流电压、电流和第1个仿真实验中测的间谐波含量相差不大,因为前

者在理想电源下不产生间谐波,后者则因为线路阻抗远大于换流器时变阻抗,所以间谐波也不明显;而第2个仿真实验整流侧的交流电流明显比第1个仿真实验大得多,尤其是48、216、276 Hz等间谐波的含量远大于第1个仿真实验,原因是由于48 Hz接近50 Hz,所以通过FFT分析之后48 Hz的间谐波含量最大,而574和674 Hz则为表1中的“理想供电电源情况下间谐波”产生的整流侧交流电流间谐波中 $k=1$ 、 $m=1$ 的情况,由此基本证明了上述理论分析的正确性。

表5中所列出的是除仿真实验1、2中都会产生的间谐波之外,在畸变电源的情况下新生成的间谐波,例如20、30、80、530、570 Hz等。从表5中可看出,按本文所推数学模型计算的间谐波含量和仿真结果基本符合,直流侧电压和电流中30 Hz的间谐波含量最多,而交流侧电流中则主要含有20 Hz间谐波,这分别与表2中的 $(6k\pm 1)\omega_1 \pm \omega_i$ 及 $2p\omega_1 \pm \omega$ 的 k 和 p 分别等于0时的结果相符合,由此证明了理论分析的正确性。

表5 电源含畸变谐波时系统的部分间谐波

Tab. 5 Analysis of interharmonic with distorted supply sources

频率/Hz	整流侧直流电压谐波含有率/%		频率/Hz	整流侧直流电流谐波含有率/%		频率/Hz	整流侧交流电流谐波含有率/Hz	
	计算	仿真		计算	仿真		计算	仿真
	20	1.00		1.03	20		3.20	3.38
30	18.53	19.63	30	14.93	16.53	30	2.30	2.43
80	0.19	0.21	80	0.38	0.39	80	10.22	10.87
120	3.71	3.86	120	1.47	1.50	120	0.11	0.18
240	0.07	0.07	240	0.14	0.15	240	0.20	0.21
480	0.38	0.41	480	0.21	0.21	480	0.79	0.91
530	4.32	4.48	530	0.84	0.89	520	4.02	4.22
570	3.60	3.78	570	0.82	0.92	580	3.98	4.13
630	1.70	1.90	630	0.20	0.29	620	2.56	2.88
670	0.15	0.16	670	0.06	0.06	680	1.39	1.72
1 130	0.03	0.03	1 130	0.03	0.03	720	0.20	0.24
1 170	0.11	0.12	1 170	0.02	0.02	1 080	0.39	0.48
1 230	0.09	0.11	1 230	0.02	0.04	1 120	1.00	1.00
1 270	0.02	0.02	1 270	0.01	0.03	1 180	1.23	1.31
1 730	0.01	0.01	1 730	0.02	0.02	1 220	0.79	0.84

4 结论

(1) 交直流并联输电系统在正常运行方式下运行时,直流线路和交流线路都不产生间谐波。

(2) 交流系统发生低频振荡时,直流线路和交流线路都产生间谐波。

(3) 交流输电线路产生畸变谐波时,直流线路和交流线路都产生间谐波。

(4) 本文还给出了一个典型交直流并联输电系统的稳态谐波计算结果, 实证了理论分析方法的正确性。

参考文献

- [1] 曾艳, 任震, 余涛. 基于调制迭代谐波分析法的交直流混联输电系统多谐波源研究[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 26-29.
Zeng Yan, Ren Zhen, Yu Tao. Study on multi-harmonic sources in AC/DC hybrid transmission system based on modulation and iterative harmonic analysis method[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 26-29(in Chinese).
- [2] Gunder E W. Interharmonics in power system[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2001.
- [3] Ruiz J, Aramendi E, Leturiondo L A, et al. Estimating the interharmonic content in the power supply system[C]. Proceedings of the 1998 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, Israel, 1998.
- [4] Rifai M R, Ortmeyer T H, McQuillan W J. Evaluation of current interharmonics from AC drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 3(15): 1094-1098.
- [5] Tayjasanant T, Wang Wencong, Li Chun, et al. Interharmonic-flicker curves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1017-1024.
- [6] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电, 2001, 18(3): 6-9.
Lin Haixue. Interharmonics in electrical power system[J]. Distribution & Utilization, 2001, 18(3): 6-9(in Chinese).
- [7] 马秉伟, 刘会金, 周莉, 等. 一种基于自回归模型的间谐波谱估计的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 79-83.
Ma Bingwei, Liu Huijin, Zhou Li, et al. An improved algorithm of interharmonic spectral estimation based on AR model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 79-83(in Chinese).
- [8] 钱昊, 赵荣祥. 基于插值 FFT 算法的间谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 87-91.
Qian Hao, Zhao Rongxiang. Interharmonic analysis based on interpolation FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 87-91(in Chinese).
- [9] 李晶, 裴亮, 郁道银, 等. 一种用于电力系统谐波与间谐波分析的超分辨率算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 35-39.
Li Jing, Pei Liang, Yu Daoyin, et al. A super-resolution algorithm for harmonic and inter-harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 35-39(in Chinese).
- [10] 张宇辉, 金国彬, 李天云. 基于自适应最优核时频分布理论的间谐波分析新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 84-89.
Zhang Yuhui, Jin Guobin, Li Tianyun. A novel approach to interharmonics analysis based on adaptive optimal kernel time-frequency distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 84-89(in Chinese).
- [11] Liu Zhongdong, Himmel J, Bonfig K W. Improved processing of harmonics and interharmonics by time-domain averaging[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4): 2370-2380.
- [12] Lobos T, Leonowicz Z, Rezmer J, et al. High-resolution spectrum-estimation methods for signal analysis in power systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 1(55): 1094-1098.
- [13] Hu L, Yacamini R. Calculation of harmonics and interharmonics in HVDC schemes with low DC side impedance[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(6): 469-476.
- [14] Hu L, Ran L. Direct method for calculation of AC side harmonics and interharmonics in an HVDC system[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(6): 329-335.
- [15] Hu L, Yacamini R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [16] Hu L, Morrison R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC system operation on an unbalanced supply[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(2): 973-980.
- [17] Hu L, Morrison R E. AC side equivalent circuit-based method for harmonic analysis of a converter system[J]. IEE Proceedings: Electric Power Applications, 1999, 146(1): 103-110.
- [18] Carbone R, Menniti D, Sorrentino N, et al. Iterative harmonic and interharmonic analysis in multiconverter industrial systems[C]. Harmonics and Quality of Power 8th International Conference, Athens, Greece, 1998.
- [19] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.
Wang Tieqiang, He Renmu, Wang Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25(in Chinese).
- [20] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.
Xu Yanhui, He Renmu, Han Zhiyong. The cause analysis of turbine power disturbance inducing power system low frequency oscillation of resonance mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 83-87(in Chinese).



余 涛

收稿日期: 2007-10-30.

作者简介:

余 涛(1974—), 男, 副教授, 博士, 从事高压直流输电运行与控制, 电力系统谐波分析和治理等方面的研究, taoyu1@scut.edu.cn;

史 军(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电及电力系统谐波分析和治理。

(编辑 谷 子)