

直流输电引起的谐波不稳定及其相关问题

郝 巍¹, 李兴源¹, 金小明², 吴小辰², 颜 泉¹, 李 峰¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川省成都市 610065; 2. 中国南方电网技术研究中心, 广东省广州市 510620)

摘要: 直流输电引起的谐波不稳定是指在换流站附近有扰动时谐波振荡不易衰减甚至放大的现象, 主要表现为换流站交流母线电压严重畸变。为减小谐波不稳定发生的概率, 保证直流系统运行的安全、稳定性, 对谐波不稳定现象进行深入研究是十分必要的。文中分析了谐波不稳定现象产生的机理, 在此基础上列举了该问题的几种主要研究方法, 最后提出了谐波不稳定的抑制对策, 对未来谐波不稳定的研究重点和抑制措施提出了一些建议。

关键词: 谐波不稳定; 直流输电; 抑制对策

中图分类号: TM76; TM721.1

0 引言

随着高压直流(HVDC)输电的发展, 相关的谐波问题日显突出。HVDC 换流器在交流侧为谐波电流源, 在直流侧为谐波电压源。在某些特定条件下, 还有可能引发谐波放大甚至谐波不稳定。

直流输电引起的谐波不稳定是指在换流站附近有扰动时, 谐波振荡不易衰减甚至放大的现象, 主要表现为换流站交流母线电压严重畸变。发生谐波不稳定时, 谐波电流放大几倍甚至几十倍, 对电力系统的危害是非常严重的。特别对换流变压器、电容器和与其串联的电抗器等元件将形成很大的威胁, 常常使其损坏; 而电压的畸变则会导致直流输电系统运行困难甚至系统闭锁^[1-2]。

对谐波不稳定进行分析的关键在于如何求取计及了换流器阻抗频率特性的系统谐振频率, 而换流器的高度非线性使研究变得困难。特征值分析可以计及换流器的阻抗特性^[3]; 文献[4]通过频域分析法对换流器的阻抗特性进行了计算; 文献[5]用频率扫描法计算了换流器交流侧的频率阻抗特性; 文献[6]通过小信号分析法研究了 HVDC 谐波交互影响, 并提出了后来被称为混合谐振的概念。

我国未来将成为直流输电线路最多的国家之一, 研究分析直流系统和其他非线性元件与交流系统相互作用下的谐波振荡及其抑制措施, 对直流输电装置的设计与配置有很好的实际工程应用价值。

本文概述了国内外谐波不稳定现象的产生机理、研究方法和控制对策。对将来研究谐波不稳定的重点和抑制谐波不稳定的方法进行了展望。

1 谐波不稳定的产生机理

谐波不稳定的发生过程, 简言之, 是交直流侧电压、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, 造成谐波振荡放大, 最终导致换流站交流母线电压严重畸变^[1]。

揭示直流输电引起的谐波不稳定的机理, 是许多科研人员共同努力的结果。首先对这个现象进行研究的是 Ainsworth, 他对直流输电换流器非特征谐波的相互作用特性进行了分析, 认为谐波不稳定是与按相触发控制方式有关的, 并提出了一种基于锁相倍频电路的等间隔触发脉冲控制方式作为解决的办法, 目前, 等间隔触发脉冲控制方式已经完全取代了按相触发控制方式。

之后, Ainsworth 又发现换流变压器铁心饱和也能引起谐波不稳定现象, 即所谓的铁心饱和型谐波不稳定。铁心饱和不稳定是由交直流系统中过多的低次谐波交互影响造成的, 这些谐波通过变压器的磁通偏移放大, 谐波和换流器交互影响又激励了这种放大。这种铁心饱和和不稳定在文献[7]以方程的形式描述出来, 而 Burton 等人^[8]从计算结果中得到了与 Larsen^[6]一致的交互系数, 并且与经验系数进行了比较, 找到了引起铁心饱和和不稳定的交直流电路条件。铁心饱和谐波不稳定即使在等间隔触发脉冲控制方式下也照样发生。

对换流器引起的谐波不稳定进行深入研究的是 Yacamini 和 Oliveria, 他们在文献[9]中提出了交流侧和直流侧互补谐振的概念: 当交流侧的并联谐振

收稿日期: 2006-03-23; 修回日期: 2006-05-08。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217907); 国家自然科学基金资助项目(50595412; 50577044)。

频率 f_{ac} 与直流侧的串联谐振频率 f_d 之间满足式(1)时,谐波不稳定即有可能发生。

$$f_{ac} = \pm f_d + (k_p \pm 1)f_1 \quad (1)$$

式中: p 为换流器的脉动数; f_1 为交流系统基波频率; k 为自然数。

式(1)说明,当交流侧的并联谐振频率与直流侧的串联谐振频率刚好满足交直流两侧谐波相互转换的频率关系时,就发生互补谐振。

具体地,从换流站来看,总的系统阻抗与电源阻抗和滤波器阻抗并联,常常可能出现在低于特征谐波最低次某个频率的并联谐振。在弱交流系统^[10]情况下,并联谐振问题通常更为突出。此外,交流系统的阻抗角越大,对谐振的阻尼就越小。没有任何当地负荷的远方发电机直接馈电给 HVDC 输电系统时,整流侧其余交流系统提供的阻尼非常小。这样的 HVDC 输电系统可能出现谐波不稳定。

由于滤波器的设计通常用来抑制特征谐波,因此非特征谐波能够注入交流系统。从而,谐波不稳定性的机制可以描述如下:频率为 f_h 的非特征谐波注入系统时,产生同样频率的谐波电压,并且叠加在电源电压上,因而换流器将频率为 f_h 的谐波电压调制成直流侧频率为 $f_h \pm f_s$ (f_s 为电源频率)的谐波电压。在直流侧, $f_h \pm f_s$ 的谐波电压产生同样频率的谐波电流。直流侧 $f_h \pm f_s$ 的谐波电流将在交流侧反映为 f_h 的谐波电流。在一定的条件下,这个过程可能造成谐波频率放大,从而引起谐波不稳定^[1]。

例如,若直流侧在基波频率下发生串联谐振(见图1),交流侧在2次谐波频率下发生并联谐振(见图2),就刚好满足互补谐振的条件。因为这种情况下,交流侧的2次谐波电压比较大,反映到直流侧就存在较大的基频谐波电压,而直流侧刚好在基频上发生串联谐振,因而会产生较大的基频谐波电流,而直流侧的基频谐波电流反映到交流侧又变为2次谐波电流,而交流侧在2次谐波频率下并联谐振,因而会产生更大的2次谐波电压,这样一个正反馈过程就会导致谐波不稳定。

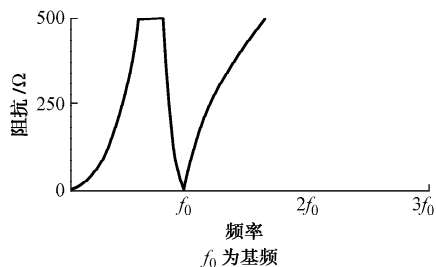


图1 直流侧频率阻抗

Fig. 1 DC side impedance/frequency

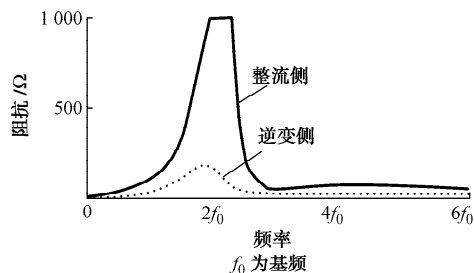


图2 交流侧频率阻抗

Fig. 2 Total AC system impedance/frequency

而且,这种情况下直流侧的基波电流反映到交流侧为2次谐波电流和直流成分,而直流成分通过换流变压器会造成换流变压器偏磁,从而产生较大的3次谐波电流。因此,有些直流工程在交流侧安装了3次谐波滤波器,以消除交流侧的3次谐波并联谐振。

同样,若直流侧在2次谐波频率下发生串联谐振,交流侧在3次谐波频率下发生并联谐振,也构成互补谐振的条件,有可能诱发谐波不稳定。

2 谐波不稳定的研究方法

对于谐波不稳定的分析,实际上是要找到系统发生谐波不稳定的条件,这个问题的关键又在于如何计算交流侧的并联谐振频率 f_{ac} 和直流侧的串联谐振频率 f_d 。如果不考虑交直流系统的相互作用,对交流侧和直流侧孤立地计算,即采用简化模型^[11],往往得到的整个系统的谐波不稳定频率会与实际有一定偏差,需要将仿真结果在计算出的频段附近进行修正。

1989年,Larsen等人在文献[6]中提出了后来被称为混合谐振的概念。即在计算交流侧或直流侧的阻抗频率特性时,将换流器的等效阻抗考虑在内,这样得到的任意一侧阻抗频率特性已经包含了另一侧系统和换流器及其控制系统的作用,因而反映了整个系统的综合性效果。因此,如果在任意一侧发生谐振即为混合谐振,如果在混合谐振频率点上相应的阻尼电阻为负,就会出现谐波不稳定。所以,在分析谐波不稳定问题时,必须考虑换流器及其控制系统的作用,即在计算交流侧或直流侧的阻抗频率特性时,将换流器的等效阻抗考虑在内,这样得到的任意一侧阻抗频率特性已经包含了另一侧系统和换流器及其控制系统的作用,因而反映了整个系统的综合性效果。因此,工作的重点应该是如何求取计及了换流器阻抗频率特性的系统谐振频率。

主要研究方法如下。

2.1 小信号分析法

小信号分析法是一种将系统模型线性化的方法。Larsen 通过小信号分析法研究了 HVDC 谐波交互影响问题,而且从线性化的状态空间模式的系统矩阵中计算了交互系数。

文献[12]使用能够直接线性化换流器、控制器和状态空间形式下的交直流系统的程序 MANSTAB 及其提供的传递函数,分析了铁心饱和和不稳定。这种方法成功地用于鉴别铁心饱和和不稳定,以及导致和换流器交流母线上负序电压有关的 2 次谐波振荡放大的条件。

2.2 谐波特征值分析法

谐波特征值分析法类似于小干扰(小信号分析法)稳定的特征值分析法。需要建立系统的谐波状态方程,线性化后,求解状态矩阵特征值^[13];通过所求出的特征值虚部判断其振荡频率;实部的模值确定系统在各次谐波频率上的衰减系数。以此作为谐波振荡甚至不稳定参考的重要标志。这种方法的缺点是:①建立大系统的状态方程非常复杂;②元件的非线性和系统的不对称对谐波特性影响很大,而线性化的方程难以描述这些影响^[14]。

1992 年,Hamad 将这种方法用于分析加拿大 Châteauguay 市背靠背 HVDC 输电方案中的 2 次谐振问题^[3]。其中计及了在某些控制方式下,Châteauguay 和美国及 Beauharnois 相连的 765 kV 输电线路的交互影响;解释了 HVDC 输电系统逆变器侧存在 2 次谐波不稳定的机理;同时研究了在 Châteauguay 终端改变静态无功补偿器控制参数时所产生的影响,并对附加直流控制和 2 次谐波滤波器做了评估。

2.3 频域分析和传递函数法

文献[4]提出了一种线性化的直接确定 12 脉波 HVDC 输电系统换流器频率阻抗的方法,即频域分析法。该方法能分析直流和交流侧换流器阻抗,并考虑了触发角控制系统、换相过程和换相过程的异常,并用动态仿真证实了该阻抗预测的准确性。在谐波域中采用开关函数构造了换流器的相应模型,采用谐波分析法对 HVDC 输电系统换流站的模型和换流站与交流系统之间的联系在谐波域中进行了分析。采用频域调制算法将谐波源与交流系统分别迭代来计算系统中的谐波分布。这对换流器的各种情况,如脉冲触发不平衡、换相失败等,都有很好的描述。此外,针对 HVDC 输电系统内特定的不同负荷、三相不平衡以及换流站电压混杂谐波分量的情况进行了分析。

2005 年,由 Riedel 提出了一种阻抗传递函数法

来计算换流器交直流侧的频率阻抗^[15]。这种阻抗传递函数是通过电压电流传递函数推导出来的,所得阻抗表达式考虑了换流变压器变比、触发角、叠弧角以及交流电压和直流电流的相角。这种方法揭示了换流器交流侧和直流侧的阻抗是如何经一个阻抗传递函数联系起来的。此外,阻抗传递函数的方程还可以用来计算整流器和逆变器交流侧正负序电压电流以及直流侧电压电流。

Riedel 的阻抗方程和 Wood 给出的方法^[5]有所不同,但是,由它们算出的结论(频率阻抗)却是极为相近的。

2.4 时域仿真-频率扫描法

有关电力系统许多问题的研究方法大致可分为解析法和仿真法 2 类。解析法一般采用简化模型,以突出重点研究的对象;随着计算机和仿真技术的发展,数字仿真程序已得到普遍认可及应用。而且,时域仿真方法^[16-18]能够计及高度非线性的换流器和系统的不对称等。文献[5]基于建立在电磁暂态仿真程序上的 CIGRE 模型^[19],通过扫描的方法识别了谐波不稳定。该方法与其前面的方法相比更加精确,能识别交直流混合输电中潜在的不稳定。

历史上,很多电流系统的问题是通过潮流和(机电)暂态稳定程序来研究的,但这些程序在处理谐波不稳定时是不够的。因此,Xiao Jiang 和 Gole 使用电磁暂态仿真程序 EMTP^[20]。交直流阻抗用真实的 RLC 和变压器模型,能够精确地在 1 Hz~2 kHz 频率范围内表示。其他非线性元件也更精确地包含在内。EMTP 的一大特点是步长小。对于 HVDC 控制和系统故障研究来说,50 μ s 的步长是常用的。此步长对于 50 μ s 波形来说不到 1°。

求取谐波阻抗的具体方法是:在系统稳定的条件下,将一组频率不同的电流注入到交流母线中,如图 3 所示,注入点即定义交流阻抗的位置。系统阻抗通过 V_h/I_h 获得。

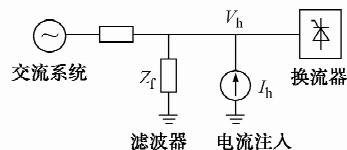


图 3 系统阻抗的频率扫描法

Fig. 3 Frequency scanning method for system impedance

为了能够模拟实际的大规模系统,并考虑非线性元件和系统不对称条件的影响,而且能够得到比较精确的谐波分析结果,应该采用机电暂态和电磁暂态混合时域仿真程序^[21],如 NETOMAC。NETOMAC 的重要特点是可以对交直流系统的直

流部分和需要进行详细研究的交流部分采用电磁暂态(精确模型)描述,并对不需要详细研究的交流系统采用机电暂态描述。通过机电暂态和电磁暂态的混合仿真,可实现对谐波不稳定的精确研究^[22]。

3 谐波不稳定的抑制方法

目前,关于谐波不稳定的控制方法,主要有2种:非特征谐波滤波器、附加谐波阻尼电路^[3,23];在原有控制系统基础上进行协调和修改^[24]。而未来对于谐波不稳定的控制趋势则是使用有源滤波器^[25-28]。此外,如果采用基于电压源换流器(VSC)的VSC-HVDC输电系统,对于谐波不稳定的抑制将有更加明显的优势。

3.1 非特征谐波滤波器

将调谐到2次或3次吸收频率的交流滤波器安装在换流器交流母线上,这种滤波器的作用是在所有控制方式下吸收2次(或3次)谐波,从而保证系统稳定运行,同时也提供了额外的无功补偿。这种方法实际上完全忽略了谐波不稳定的机理。此外,它还能够抑制直流侧基频附近的谐波电流(有可能折射为交流侧的2次谐波电压)。

3.2 附加谐波阻尼电路

这种方法是将一个附加的2次谐波阻尼电路用于直流控制器中,此控制电路的原则是阻尼直流中的任何一次谐波振荡。

使用附加电路后,在逆变侧等间距触发^[29]的条件下,2次谐波和换流器交流电流中的直流成分大大减少,阻尼效果非常明显。

3.3 控制电路的协调和改进

文献^[26]指出安装非特征滤波器和附加阻尼电路虽然能达到抑制低次谐波的目的,但是价格昂贵,如果从对原有控制电路的协调和改进入手,效果令人满意,而且价格便宜。

1) VDCOL 的改进。常用的 VDCOL 特性能使交流系统整流、逆变侧从严重故障中快速恢复,而在负荷不能提供阻尼的弱交流系统中,让控制电流在一个合适的速度下使交流系统得到恢复,效果会更好。

2) 优化直流控制。在谐波谐振问题中,可以通过减小控制增益(针对有可能发生谐振的频率)来优化直流控制,同时使控制器有快速充分的动态响应。

3) 定时脉冲触发(TPG)的改进。对 TPG 进行一定的改进也能达到抑制谐波不稳定的目的。具体办法是:当每相电压过零点时,记录下该周期(2个连续的零点之间的时间间隔),并在下一次过零时更新周期,使得同步误差缓慢减少。

3.4 使用有源滤波器

在 HVDC 输电系统中装设有源滤波器的方式分串联和并联2类,如图4所示。方式1、方式2是直接串入直流输电系统中,由有源滤波器产生一个与系统谐波电压大小相等、相位相反的电压去抵消原系统的谐波电压,消除输电系统的谐波。从图4中可以看出,有源滤波器将承受与直流输电系统相同的高(绝缘)电压、大电流。方式3、方式4是通过电容或电感分压后并入系统,有源滤波器要求的电压较低、电流较小。特别是方式4,在原有双调谐无源滤波器滤去大部分特征谐波的基础上,有源滤波器能够改善其滤波特性并滤掉剩余的其他谐波。这样,有源滤波器的电压、电流及容量将大大减小^[28]。这种由无源滤波器和有源滤波器共同构成的滤波器称为混合型滤波器^[30]。

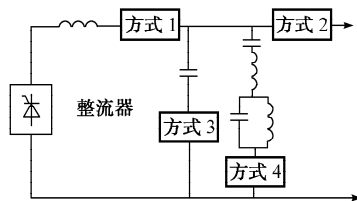


图4 有源直流滤波器的设置方式

Fig. 4 Alternative of configuration of active DC filter HVDC system

在无源滤波器基础上加装有源滤波器构成混合滤波器,可以对高压直流输电系统的谐波电流、特别是非特征低次谐波进行进一步抑制,不但可以降低对有源滤波器电压、电流、容量的要求,而且效果非常好,已经成为未来抑制谐波不稳定的一种趋势。

3.5 VSC-HVDC 输电系统

基于 VSC 技术的 HVDC 被称为轻型直流输电(HVDC light),采用绝缘栅双极晶体管(IGBT)的 VSC 具有关断电流的能力,可以应用脉宽调制(PWM)技术进行无源逆变^[28]。对其输出电压的分析显示,波形中所含的主要谐波的频率要比基波频率高得多,是很容易滤除的^[31]。由于谐波不稳定现象通常发生在低次谐波,所以大大降低了谐波不稳定发生的概率。此外,VSC-HVDC 输电系统,对系统谐波的抑制效果明显优于传统 HVDC 输电系统^[32]。

4 结语

本文对谐波不稳定的机理、研究方法和当前控制措施进行了综述。

在分析研究方面,虽然对直流输电系统谐波不稳定的研究已日臻完善,但在计算交流侧或直流侧的频率阻抗特性时,如何确切地计入换流器本身的

作用,仍然有待更进一步的研究。

在控制措施方面,由于技术经济的原因,在 HVDC 输电系统中采用有源滤波器和无源滤波器构成的混合直流滤波器是未来的发展方向。此外,使用 VSC 替代传统 HVDC 输电系统对抑制谐波不稳定能起到显著效果。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制. 北京: 科学出版社, 1998.
LI Xingyuan. The operation and control of HVDC system. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] 夏道止. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波. 北京: 水利水电出版社, 1994.
XIA Daozhi. The harmonic analysis and filtering for HVDC system. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1994.
- [3] HAMMAD A E. Analysis of second harmonic instability for chateauguay HVDC/SVC scheme. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 410-415.
- [4] WOOD A R, ARRILLAGA J. The frequency dependent impedance of an HVDC converter. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(3): 1635-1641.
- [5] XIAO Jiang, GOLE A M. A frequency scanning method for the identification of harmonic instability in HVDC systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1875-1881.
- [6] LARSEN E V, BAKER D H, MELVER J C. Low-order harmonic interactions on AC/DC systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 493-501.
- [7] STEMMLER H. HVDC back-to-back interties on weak AC systems // Proceedings of CIGRE Symposium on AC/DC Transmission Interactions and Comparisons, Sept 28-30, 1987, Boston, MA, USA. 1987: 300-308.
- [8] BURTON R S, FUCHSHUBER C, WOODFORD D A, et al. Prediction of core saturation instability at an HVDC converter. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1961-1969.
- [9] YACAMINI R, OLIVERIA J C. Instability in HVDC schemes at lower-order integer harmonics. IEE Proceedings-C, 1980, 127(3): 179-188.
- [10] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析. 电网技术, 2003, 27(11): 18-21.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength. Power System Technology, 2003, 27(11): 18-21.
- [11] 王路, 李兴源, 颜泉. 复杂交直流系统的双时标混合协调仿真. 电力系统自动化, 2005, 29(22): 28-32.
WANG Lu, LI Xingyuan, YAN Quan. Hybrid dual-time scale simulation technology for complex AC-DC power grids. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(22): 28-32.
- [12] TAIZO H, Joukichi M, OUE Y. Screening for HVDC system core saturation instability. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1291-1297.
- [13] 武志刚, 张尧. 电力系统特征值与状态变量对应关系分析. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 23-26.
WU Zhigang, ZHANG Yao. Analysis of relationship between eigenvalues and state variables in power systems. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 23-26.
- [14] 刘小河, 赵刚, 于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 30-34.
LIU Xiaohe, ZHAO Gang, YU Juanjuan. Simulations on the impaction in power supply network caused by the nonlinear characteristics of electric arc furnace. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 30-34.
- [15] RIEDEL P. Harmonic voltage and current transfer, and AC- and DC-side impedances of HVDC converters. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2095-2099.
- [16] 蒋平, 施鸣鹤. 供电系统谐波潮流的仿真分析. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 51-54.
JIANG Ping, SHI Minghe. Simulation of harmonic load flow in power supply system. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(7): 51-54.
- [17] 张诚, 廖勇, 孙才新. 三峡交直流混合输电系统谐波的仿真分析和计算. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 47-49.
ZHANG Cheng, LIAO Yong, SUN Caixing. Simulation and calculation of harmonics for Three Gorges AC and DC transmission system. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 47-49.
- [18] STEURER M, WOODRUFF S. Real time digital harmonic modeling and simulation; an advanced tool for understanding power system harmonics mechanisms// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol 1, Jun 6-6, 2004, Denver, CO, USA. New York, NY, USA: IEEE, 2004: 773-776.
- [19] 杨汾艳, 徐政. 直流输电系统典型暂态响应特性分析. 电工技术学报, 2005, 20(3): 45-52.
YANG Fenyan, XU Zheng. Typical transient responses in HVDC transmission system. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 45-52.
- [20] SZECHTMAN M, WEISS T, THIO C V. First benchmark model for HVDC control studies. Electra, 1991 (135): 54-73.
- [21] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [22] 王路, 李兴源. 交直流混联系统的多速率混合仿真技术研究. 电网技术, 2005, 29(15): 23-27.
WANG Lu, LI Xingyuan. Study on multirate hybrid simulation technology for AC/DC system. Power System Technology, 2005, 29(15): 23-27.
- [23] BODGER P S, IRWIN G D, WOODFORD D A. Controlling harmonic instability of HVDC links connected to weak AC systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 2039-2046.
- [24] KAUL N, MATHUR R M. Solution to the problem of low order harmonic resonance from HVDC converters. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(4): 1160-1167.
- [25] GOLE A M, MEISINGSET M. An AC active filter for use at capacitor commutated HVDC converters. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 335-341.
- [26] 朱革兰, 任震. 高压直流输电系统混合直流滤波器性能研究. 电力自动化设备, 2001, 21(8): 5-8.
ZHU Gelan, REN Zhen. A study of hybrid DC filter for HVDC system. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(8): 5-8.

- [27] 王莉娜,付青,罗安. 工厂供电系统谐波谐振的抑制. 电力系统自动化, 2001, 25(20): 41-44.
WANG Lina, FU Qing, LUO An. Damping of harmonic in industrial power system. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(20): 41-44.
- [28] 肖国春,刘进军,杨君,等. 高压直流输电用直流有源电力滤波器的研究. 电工技术学报, 2001, 16(1): 39-42.
XIAO Guochun, LIU Jinjun, YANG Jun, et al. The study on DC active power filter for HVDC system. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 39-42.
- [29] GOLE A M, SOOD V K. A static compensator model for use with electromagnetic transients simulation programs. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(6): 1398-1407.
- [30] 李庚银,吕鹏飞,李广凯. 轻型高压直流输电技术的发展与展望. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai. Development and prospects for HVDC light. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [31] 王兆安,黄俊. 电力电子技术, 4 版. 北京: 机械工业出版社,

2001.

WANG Zhao'an, HUAN Jun. Power electronics technology. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2001.

- [32] 束洪春,王晶,陈学允. VSC 的 FACTS 元件对动态电能质量的影响. 华北电力大学学报, 2003, 30(3): 1-8.
SHU Hongchun, WANG Jing, CHEN Xueyun. Study on impacts of VSC-based HVDC upon dynamic power quality. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(3): 1-8.

郝巍(1982—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制. E-mail: talent_act@sina.com

李兴源(1945—),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作。

金小明(1964—),男,教授级高级工程师,从事电力系统规划设计及直流输电研究工作。

A Survey of Harmonic Instability and Related Problem Caused by HVDC

HAO Wei¹, LI Xingyuan¹, JIN Xiaoming², WU Xiaochen², YAN Quan¹, LI Feng¹

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. Technology Research Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, China)

Abstract: Harmonic instability caused by HVDC means that harmonic oscillation doesn't attenuate or even amplifies seriously when a disturbance happens in the converter station. For decreasing the probability of harmonic instability and guaranteeing the safety and stability of HVDC's operation, it is necessary to research the harmonic instability deeply. This paper investigates the mechanism of harmonic instability, and enumerates research methods basing on this mechanism. Finally it indicates the methods of trapping harmonic instability, and tables some proposals to the key of researching harmonic instability and control measures in the future.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217907), and National Natural Science Foundation of China (No. 50595412 and 50577044).

Key words: harmonic instability; HVDC; control method