

高压直流输电系统的谐波分析方法综述

史 丹,任 震,余 涛

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 分析了用于高电压直流输电(HVDC)系统谐波分析的比较典型和有效的若干方法,如统一基波和特征谐波潮流算法、调制理论、谐波域分析法等,总结了它们的基本原理、实现算法、应用范围及各自的特点,指出了对换流器建模时需要注意的特殊问题,介绍了 HVDC 系统多谐波源谐波分析的调制迭代谐波分析法及周期时间序列分析法,并对 HVDC 系统谐波分析以后的发展方向作出展望。

关键词: 高电压直流输电系统; 谐波分析; 谐波模型; 多谐波源

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0093-05

在远距离输电和 2 个不同频率交流系统互联等场合,高压直流输电(HVDC)工程得到广泛应用。由于大功率电力电子设备的投入,谐波问题也随之产生。随着电网的不断发展,我国还即将形成多个交直流并联输电系统和多馈入直流输电系统的复杂电力系统^[1]。这些新的发展趋势对系统的谐波分析方法提出了新的、更高的要求。对于 HVDC 系统的谐波分析方法,已经形成了一系列理论和方法,它们或比较成熟,已经得到广泛应用;或比较新颖,但还有待于进一步发展和完善。本文在综合、比较了大量分析方法和相关文献的基础上,阐述了其中比较典型或有发展潜力的方法,诸如统一基波和特征谐波潮流算法、谐波域分析法等基本原,讨论比较了它们的实现方法、应用范围和各自特点,并展望了包含多回 HVDC 系统的多谐波源分析的研究方向。

1 HVDC 系统谐波分析的一般方法

1.1 迭代谐波分析法

考虑到换流器两侧交直流系统谐波之间的相互影响,直接通过换流器注入到电网中的谐波计算网络中的谐波分布是不准确的。采用迭代谐波分析法 IHA (Iterative Harmonic Analysis) 法分析 HVDC 系统中的谐波可有效计及交直流系统谐波的相互作用^[2-4]。此外,它还可以用于换相阻抗不平衡、变压器电磁饱和等非理想情况下的谐波分析。

IHA 法基于 Gauss-Seidel 迭代算法,在每次迭代中,以上一轮迭代得到的换流器交流端的畸变电压作为换相电压,通过在时域中求解换流器的相关方程,获取直流侧电压值及相应直流侧电流值,再结合开关切换时间和换相过程,求出换流器注入到交流侧的谐波电流,继而由交流网络计算换流器交流端的畸变电压,进入下一轮的迭代计算。

IHA 法物理概念清晰,相应程序的编写比较简单,且可以用它来研究谐波产生和相互作用的机理。然而,当交流系统的谐波阻抗较大,换相电抗较小时,迭代计算容易发散。对此,文献[5]提出在换流变压器一次侧和滤波器母线间插入一个匹配阻抗对以改善收敛情况。匹配阻抗对由简单的 RLC 网络构成,但它会使迭代计算的过程复杂化,而且 RLC 网络的设计也不方便。近来的研究工作更多地注重提出更好的建模方法,而不是对 IHA 方法本身的改善^[6]。

1.2 统一基波和特征谐波潮流算法

文献[7]和[8]提出了一种对 HVDC 的交直流系统的特征谐波进行统一计算的方法,它的主要思想是:在建立换流器的数学模型时,考虑到其交流侧存在谐波电压及直流侧存在谐波电流,从而得出一个比较完整的换流器数学模型,然后将它与交流系统和直流网络的数学模型一起联立求解。考虑到换流器所引起的谐波还直接与它的运行情况有关,即依赖于交流系统的基波潮流、换流器的触发角等,因此提出了对特征谐波潮流和基波潮流进行统一求解,建立更完整的交直流系统谐波分析模型。

由描述换流器换相期间动态过程的微分方程,再结合边界条件,可得到描述换流器模型的 4 个非线性方程,它们可用来确定晶闸管中的电流及换相时间。对于交流系统可以写出各 AC 节点基波功率及电压平衡方程,AD 节点基波电流平衡方程和 AD 节点谐波电流平衡方程。直流系统方程包括直流侧每极电压、电流方程,直流网络电压、电流方程及描述系统控制的直流系统给定值方程。由上述的全系统非线性方程组,利用牛顿-拉夫逊法对交直流系统的谐波潮流和基波潮流进行统一求解^[9]。

该方法较全面地考虑了交直流系统之间、基波和谐波潮流之间的相互作用对系统谐波分布的影响,采用牛顿-拉夫逊法保证了计算速度和收敛性。但所采用的换流器模型过于简单,不能用于交流系统或换流阻抗三相不对称的情况。

收稿日期:2005-09-23

基金项目:国家自然科学基金重点项(50337010);华南理工大学自然科学基金资助项目(323-E5040220)

1.3 调制理论分析法

用于换流器研究的调制理论,把换流器看成连接直流系统和交流系统的调制开关电路,用 Fourier 级数表示的开关函数表示换流器的非线性行为,该函数的作用可以类比为电阻元件的电阻值或电感元件的电感值,它描述了非线性元件,即换流器的输入、输出变量之间的关系^[10]。

各相调制开关函数是幅值为 1 的周期函数,其周期等于基波周期,当此相导通时其值为 1,此相非导通时其值为 0,此外还应考虑开关函数在换相期间的波形畸变,并将调制函数用 Fourier 级数的形式表示。设换流器交流侧的三相电压和直流侧电压分别为 u_a, u_b, u_c 和 u_{dc} , 换流器每相的电压开关函数为 S_{ua}, S_{ub}, S_{uc} , 则电压从换流器交流侧向直流侧传递的过程可以描述为

$$u_{dc} = u_a S_{ua} + u_b S_{ub} + u_c S_{uc}$$

类似地,若换流器交流侧的三相电流和直流侧电流分别为 i_a, i_b, i_c 和 i_{dc} , 换流器每一相的电流开关函数为 S_{ia}, S_{ib}, S_{ic} , 则电流从换流器交流侧向直流侧传递的过程可以描述为

$$i_a = i_{dc} S_{ia}, i_b = i_{dc} S_{ib}, i_c = i_{dc} S_{ic}$$

这样,若已知换流器的三相供电电压,由电压调制函数可计算出直流电压,经 Fourier 分解得到各次谐波电压分量,根据直流系统的谐波阻抗求出直流线路上的各次谐波电流,再由电流调制函数可以得到注入交流系统的三相谐波电流。

调制理论在开关设备的谐波分析中得到广泛应用,利用它还可方便地分析系统不对称的情况^[11-12],前者各个换相角用平均值代替,降低了模型的精度,而后者用迭代算法较准确地计算了各个换相角,精度大大提高。文献[13]研究了两端交流系统频率不等的 HVDC 系统的间谐波,用调制理论推导出间谐波的次数和幅值。Arrilaga 在文献[14]和[15]中对此方法作出改进,使之能够计及换流器触发角变化的影响,文献[12]则更精确地表示了换相期间的电流调制函数,代替了前人采用的近似线性化函数,从而大大提高了模型的精度。文献[16]指出,利用调制理论,可将换流器及换流器 DC 侧参数的影响归纳为交流侧的 1 个等效电路,使得所有的谐波计算可以在换流器的交流侧进行,由此可大大简化计算。文献[17]则进一步把这种方法应用于间谐波的计算中。

将调制理论用于谐波分析中,具有物理概念清晰、分析计算速度快等优点,而且其精度也在近几年的研究中大有提高。它尤其适用于多个开关谐波源相互作用的系统,且有利于洞察谐波产生的机理和相互作用的过程。

1.4 谐波域分析法

谐波域分析法 HDA(Harmonic Domain Analysis)^[18-19]的基本思想是由晶闸管的导通特点,划分换

流器的工作状态,并用卷积运算将这些状态联系起来。换流器晶闸管的导通顺序是有规律,且以一定的周期(基波周期)重复的。一般情况下,在 1 个周期内换流器按晶闸管的通断顺序可以分为 12 个状态,各个状态由 6 个触发角和 6 个换相角界定,并且每个状态下的换流器都可以用 1 个线性电路表示。6 个触发角可由换流控制器的分析得到,6 个换相角则由对应状态的线性电路得到,由此可以分别写出触发角失配方程和换相角失配方程。

由各个状态对应的线性电路分别求得该导通状态下的直流输出电压。再对换流器的每个状态构造 1 个样本函数,它也是以基波周期为周期的时间函数,换流器处于该状态时其值为 1,不处于该状态时其值为 0,并表示为 Fourier 级数的形式。通过对各状态的直流输出电压和相应样本函数的卷积再求和,就可以得到总的直流输出电压。类似地,也可以方便地得到换流器交流侧的电流。

根据电流和电压、导纳的关系分别列出交、直流系统各谐波次数的失配方程^[20],与上述的触发角失配方程和换相角失配方程联立形成全系统的非线性方程组,采用牛顿-拉夫逊法求解。所形成的全系统方程组阶数较高,因此文献[20]还提出了 3 个提高方程求解效率的方法,即:对 Jacobian 矩阵元素进行截断处理,将相互影响较小的量之间的元素处理成零;当交流系统为强系统时,可以对全系统方程式解耦,方程降阶;采用稀疏技术存储 Jacobin 矩阵。文献[21]将谐波域理论扩展运用到整个 HVDC 系统的谐波分析中,并计及 HVDC 的控制方式。文献[22]则进一步将它应用于双极 HVDC 系统中。

谐波分析的谐波域法建立了换流器较为详尽的模型,能全面地考虑到系统三相不对称、触发角和换相角的变化等因素。形成全系统的非线性方程组并用牛顿-拉夫逊法求解,计算速度快,并保证了较高的收敛性。但系统的方程组维数较高,若用于多谐波源的分析可能导致“维数灾”,应与较好的降阶措施结合运用。

2 换流器建模的特殊问题

2.1 换流器的三脉波模型

文献[23]指出,在 HVDC 系统中计算直流侧谐波对通信线路的干扰时,传统的六脉波模型已经不能满足计算精度要求,需要建立一种新的换流器谐波模型。文献[24]提出了满足此需要的三脉波模型,它将每个 6 脉波桥表示为 2 个 3 脉波桥,在换流器的内阻抗中加入了漏电流通路,并采用了更精确的换流桥以反映 $3n$ 次谐波性质,体现出换流器的 $3n$ 次谐波的激励电压。该模型包含了杂散电容的影响,计及了谐波电流的全部重要通路。

文献[25]和[26]均采用此模型对实际直流输电

工程的直流侧谐波进行了分析计算,结果表明采用此模型的计算值与现场测试结果相当吻合。文献[27]中指出:对 HVDC 系统直流侧谐波的分析,推荐采用三脉波模型。文献[28]基于三脉波模型,采用在中性线并联一大电容,以及在极线和中性线间连接可以消除 3 倍次谐波的滤波器,达到更高的滤波要求。

2.2 换流器的谐波阻抗

相关研究表明,换流器交流侧和直流侧的不同频率下阻抗的计算对于交、直流系统的谐振和滤波器设计均有重要作用。如文献[29]分析了直流系统的谐振,认识到换流器直流侧等效阻抗对谐振的重要作用。文献[30]对交流侧 5 次谐波谐振进行分析,发现只有考虑换流器交流侧的 5 次谐波阻抗才能解释这一谐振现象。换流器的阻抗研究对 HVDC 系统中谐振和滤波器设计的影响已引起广泛关注。

文献[14]提出了利用传递函数分析换流器等效阻抗的表达式,是一种线性的直接方法。它用戴维南或诺顿等效电路表示完整的换流器谐波等效模型,其中的电压源或电流源表示其产生的畸变,而阻抗或导纳则可表示由给定的畸变源产生的谐波的大小。分析了触发角控制系统的影响,并指出在分析低次谐波下的阻抗时,必须考虑控制系统的影响。文献[31]在此基础上推导了阻抗转换函数,它是电流、电压传递函数的乘积,由此函数将交流侧和直流侧的谐波阻抗联系起来。

3 含多谐波源的谐波分析方法

3.1 调制迭代谐波分析法

文献[32]提出了用于多谐波源谐波分析的调制迭代谐波分析法 MIHA(Modulation and Iterative Harmonic Analysis),该方法在调制理论方法的框架下,将迭代谐波分析法融汇其中,使这 2 种方法有机地结合起来,互为补充。它结合了调制理论和迭代谐波分析法的优势,应用调制理论,将较难建模的换流站看成调制转换器,既合理地模拟出换流站的非线性特性,又解决了交直流系统的接口问题,避免了传统方法建模中非线性方程的复杂性。迭代谐波分析法则可同时考虑到交、直流系统中各自谐波电压、电流的相互影响过程,通过逐步迭代,准确求解出稳态下系统的谐波分量。

文献[32]利用 MIHA 法对一典型的交直流并联输电系统建立了谐波分析模型,其步骤为:利用调制函数计算直流侧电压;计算直流等效时变阻抗、计算直流侧电流;由调制函数计算交流侧电流继而求出交流侧电压。并由仿真计算验证了此模型的有效性和准确性。

同前文介绍的 IHA 法一样,MIHA 法的收敛性仍然是研究的难点,对于更复杂系统的建模,其收敛性有待于进一步的探讨。此外,还可以将该 MIHA 法

进一步推广到三相不平衡系统及多馈入直流输电系统的谐波研究中。

3.2 周期时间序列分析法

文献[33]提出了用于交直流并联输电系统谐波分析的周期时间序列分析法 TPTS(Transformation of Period Time Series)。它用动态分析描述换流站的运行,用稳态方程描述交直流系统的线性网络部分,并进行周期时间序列变换,得出线性网络方程的时间序列模型,较好地解决了线性网络方程式与换流器方程式的接口问题,最后通过换流变压器漏感的友模将两者结合起来。用该方法对交直流并联输电系统建模得到的全系统方程较少,避免了频域法方程式除数的膨胀,适合于较复杂的多谐波源的分析。

然而,文献[33]并未提到线性网络部分进行周期时间序列变换时,1 个周期的采样离散点的个数应如何确定,才能使系统方程数量和计算精度都达到较满意的结果。此外,换流器的模型比较简单,没有考虑到触发角和换相角的变化情况。

4 结论

本文讨论和比较了 HVDC 系统谐波分析方法中几种典型和有效的方法,并指出了换流器建模中的一些需要注意的特殊问题。

IHA 法虽然比较简单,由于采用 Gauss-Seidel 迭代算法,收敛性较差,所作的改进措施又会使计算复杂化,所以它不适用于交流谐波阻抗较大或精度要求高的情形。文献[32]表明,其也可和其他方法,如调制理论结合运用。

统一潮流算法和谐波域分析法都是在频域中形成全系统的非线性方程组,用牛顿-拉夫逊迭代算法求解,不同的是谐波域法还考虑了控制器对触发角的控制作用,而且它利用卷积算法求谐波分量,避免了 Fourier 分解得到谐波分量这个较复杂的步骤。由于形成系统的非线性方程组统一求解,方程组的阶数较高,特别是系统含有多个谐波源时,容易形成“维数灾”,对此,相关文献研究了提高方程组求解效率的措施。

用于描述换流器非线性行为的调制理论,其物理概念清晰,容易实现,且有利于分析谐波产生的传递机理。它分析计算速度快,精度也有较大改善,尤其适用于多个开关谐波源相互作用的系统分析中。

对于多谐波源 HVDC 系统的谐波分析方法已经有一定成果,但还不是很成熟。我国多个交直流并联输电系统和多馈入直流输电系统的复杂电力系统即将形成,对多谐波源 HVDC 系统谐波分析方法提出了更高要求。考虑到谐波域分析法和调制理论其独有的优点,它们可在多谐波源系统中得到进一步的发展和完善。

参考文献:

- [1] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
ZENG Nan-chao. Role of HVDC transmission in the power system development in China[J]. **High Voltage Engineering**, 2004, 30(11): 11-12.
- [2] YACAMINI R, de OLIVEIRA J C. Harmonics in multiple converter systems: a generalized approach[J]. **IEE Proc. Electr. Power Appl.**, 1980, 127(2): 96-106.
- [3] CALLAGHAN C D, ARRILLAGA J. Double iterative algorithm for the analysis of power and harmonic flows at AC-DC converter terminals[J]. **IEE Proc. Pt. C, Gener. Transm. Distrib.**, 1989, 136(6): 319-324.
- [4] ARRILLAGA J, CALLAGHAN C D. Three-phase AC-DC load and harmonic flows[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1991, 6(1): 238-244.
- [5] CUBNC R, FANTAUZZI M, GAGLIARDI F, et al. Some considerations on the iterative harmonic analysis convergence[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1993, 8(2): 487-493.
- [6] SMITH B C, ARRILLAGA J, WOOD A R, et al. A review of iterative harmonic analysis for AC-DC power systems[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1998, 13(1): 180-185.
- [7] XIA D, HEYDT G T. Harmonic power flow studies, Part I: formulation and solution[J]. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, 1982, 102(6): 1257-1265.
- [8] XIA D, HEYDT G T. Harmonic power flow studies. Part II: implementation and practical application[J]. **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, 1982, 102(6): 1266-1270.
- [9] 夏道止, 沈赞坝. 高压直流输电系统的谐波分析及滤波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [10] HU L, YACAMINI R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. **IEEE Trans. on Power Electron**, 1992, 7(3): 516-525.
- [11] HU L, YACAMINI R. Calculation of harmonic interference in HVDC systems with unbalance[C]//**Proceedings of IEE Fourth International Conference on AC and DC Power Transmission**. [S.l.]: [s.n.], 1991: 390-394.
- [12] HU L, MORRISON R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply[J]. **IEEE Trans. on Power Systems**, 1997, 12(2): 973-980.
- [13] HU L, YACAMINI R. Calculation of harmonics and interharmonics in HVDC schemes with low DC side impedance[J]. **IEE Proc. C. Gener. Transm. Distrib.**, 1993, 140(6): 469-476.
- [14] WOOD A R, ARRILLAGA J. The frequency dependent impedance of an HVDC converter[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1995, 10(3): 1635-1641.
- [15] WOOD A R, ARRILLAGA J. HVDC converter waveform distortion: a frequency-domain analysis[J]. **IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.**, 1995, 142(1): 88-96.
- [16] HU L, MORRISON R E. AC side equivalent circuit-based method for harmonic analysis of a converter system[J]. **IEE Proc. Electr. Power Appl.**, 1999, 146(1): 103-110.
- [17] HU L, RAN L. Direct method for calculation of AC side harmonics and interharmonics in a HVDC system[J]. **IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.**, 2000, 147(6): 329-335.
- [18] SMITH B C, WATSON N R, WOOD A R, et al. Steady state model of the AC/DC converter in the harmonic domain[J]. **IEE Proc. Gener. Transm.**, 1995, 142(2): 109-118.
- [19] SMITH B C, WATSON N R, WOOD A R, et al. A newton solution for the harmonic phasor analysis of AC-DC converters[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1996, 11(2): 965-971.
- [20] SMITH B C, WATSON N R, WOOD A R, et al. Newton solution for the steady-state interaction of AC/DC systems[J]. **IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.**, 1996, 143(2): 200-201.
- [21] BATHURST G N, SMITH B C, WATSON N R, et al. Modeling of HVDC transmission systems in the harmonic domain[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1999, 14(3): 1075-1080.
- [22] BATHURST G N, WATSON N R. Modeling of bipolar HVDC links in the harmonic domain[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 2000, 15(3): 1034-1038.
- [23] LARSEN E V, SUBLICH M, KAPOOR S C. Impact of stray capacitance on HVDC harmonics[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1989, 4(1): 637-645.
- [24] SHORE N L, ANDERSSON G, GANELLHAS A P, et al. A three-pulse model of DC side harmonic flow in HVDC systems[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1989, 4(3): 1945-1952.
- [25] DICKMANDER D L, PETERSON K J. Analysis of DC side harmonics using the three-pulse model for the intermountain power project HVDC transmission[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**, 1989, 4(2): 1195-1204.
- [26] 周长春, 徐政. 直流侧谐波计算的3脉动换流器模型[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 9-10.
ZHOU Chang-chun, XU Zheng. A three-pulse converter model of DC side harmonics[J]. **High Voltage Engineering**, 2002, 28(3): 9-10.
- [27] PRABHAKARA F S. IEEE Std 1124™ - 2003. IEEE guide for analysis and definition of DC side harmonic performance of HVDC transmission systems[S]. New York: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2003.
- [28] 李战鹰, 任震. 基于三脉波模型的高压直流输电系统直流侧谐波分析及滤波方案设计[J]. 继电器, 2004, 32(23): 15-17.
LI Zhan-ying, REN Zhen. DC side harmonic analysis and filter scheme design using the three-pulse model in HVDC system[J]. **Relay**, 2004, 32(23): 15-17.

[29] BAHMAN M P,BROWNELL G C,ADIELSON T,et al. DC system resonance analysis [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1986,2(1):156-164.

[30] DICKMANDER D L,LEE S Y,DESILETS G L,et al. AC/DC harmonic interactions in the presence of GIC for the Quebec-New England phase II HVDC transmission [J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,1994,9(1):68-78.

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

[32] 曾艳. 交直流并联输电系统多谐波源的模型及特性分析[D]. 广州:华南理工大学,2004.
ZENG Yan. The model and harmonic characteristics of multi-harmonic source in AC/DC parallel transmission systems[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2004.

[33] 陆治国. 交直流并联输电系统多谐波源特性及其相互影响的研究[D]. 重庆:重庆大学,1998.
LU Zhi-guo. Studying on the performance and interaction of multi-source harmonics in AC/DC hybrid trans. systems[D]. Chongqing:Chongqing University,1998.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

史 丹(1981-),女,湖北荆门人,硕士研究生,从事高压直流输电、电力系统谐波分析和治理方面的研究(E-mail:skyingsd@126.com);

任 震(1938-),男,江苏宜兴人,教授,博士研究生导师,从事电力系统规划与可靠性、小波分析、高压直流输电、电源滤波、电力市场等领域的科研和教学等工作;

余 涛(1974-),男,云南昆明人,讲师,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。

Overview of harmonic analysis methods in HVDC transmission systems

SHI Dan,REN Zhen,YU Tao

(College of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510641,China)

Abstract: Several classical and effective harmonic analysis methods in HVDC system are discussed, such as unified load flow and harmonic flow algorithm,modulation theory,harmonic domain analysis and so on,and their fundamentals,algorithms,application scopes and features are concluded. Some noticeable problems in converter modeling are pointed out. The modulation and iterative harmonic analysis and periodic time series transformation of multi-harmonic analysis in HVDC system are introduced,and the prospect of harmonic analysis in HVDC system is also brought forward.

This project is supported by National Natural Science Fund of China(50337010) and Natural Science Fund of South China University of Technology(323-E5040220).

Key words: HVDC system; harmonic analysis; harmonic model; multi-harmonic sources

+++++