

基于调制理论的换流变压器铁心饱和不稳定分析

杨小兵¹, 李兴源¹, 金小明², 郝巍³

(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; 3. 云南省电力设计院, 云南省 昆明市 650011)

Modulation Theory Based Analysis on Converter Transformer Core Saturation Instability

YANG Xiao-bing¹, LI Xing-yuan¹, JIN Xiao-ming², HAO Wei³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China;
2. Technology Research Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, Guangdong Province, China;
3. Yunnan Electric Power Design Institute, Kunming 650011, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: Due to its intuition, clear physical conception and convenient to use, in the calculation of harmonics of power system more and more attentions are paid to modulation theory. In this paper the detailed derivation of current switching function is expounded, and the mechanism causing transformer core saturation instability is presented briefly. It is the first time to apply modulation theory to solve converter transformer core saturation instability and a new method to judge such a harmonic instability is proposed; then based on the data of China Southern Power Grid in 2010 and by use of PSCAD/EMTDC, a simulation model for detailed electromagnetic transient of ± 800 kV DC power transmission system from Yunnan to Guangdong is built, and using the built model the simulation research on core saturation instability caused by three-phase grounding fault is performed. Simulation results verify the correctness of the proposed method.

KEY WORDS: modulation theory ; current switching function; core saturation instability

摘要: 阐述了电流开关函数的详细推导过程, 简要介绍了变压器铁心饱和不稳定的产生机理, 首次把调制理论应用于解决换流变压器铁心饱和不稳定问题, 并提出了一种判断此种谐波不稳定的新方法, 然后基于南方电网 2010 年数据, 采用 PSCAD/EMTDC 建立了云广 ± 800 kV 直流输电系统详细电磁暂态的仿真模型, 对三相接地故障激发的铁心饱和不稳定现象进行了仿真试验, 验证了该新方法的正确性。

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2004CB217901); “十一五” 国家科技支撑计划重点项目(2008BAA13B01)。

Project Supported by Special Fund of the National Priority Basic Research of China (2004CB217901); National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs Funded by Ministry of Science & Technology of China (2008BAA13B01)。

关键词: 调制理论; 电流开关函数; 铁心饱和不稳定

0 引言

随着高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电的发展, 相关的谐波问题日益突出^[1-5]。HVDC 换流器是高压直流输电系统中最大的谐波源, 因此精确计算换流器两侧的谐波关系显得尤其重要。调制理论由于具有运用简单、直观、物理概念清晰等优点, 在电力系统谐波计算中日益受到青睐。文献[6-10]把调制理论应用在 HVDC 的谐波分析中, 并计算出换流器直流侧到交流侧和交流侧到直流侧的谐波转换关系, 阐述了谐波的产生机理; 文献[11-12]把调制理论和迭代思想相结合, 提出了一种新的谐波计算方法; 换流变压器铁心饱和不稳定是 HVDC 中一种特殊的谐波问题, 文献[13-15]对其做了研究, 且提出了铁心饱和不稳定的判据, 但该判据的计算很困难。

为此, 本文结合调制理论的运用简单、快速等优点和换流变压器铁心饱和不稳定的特点, 首先阐述电流开关函数的详细推导过程, 然后利用调制理论求得换流器交流侧的电流表达式进而求出交流侧直流分量的表达式, 并在此基础上提出一种判断系统是否发生换流变压器铁心饱和不稳定现象的新方法, 然后基于南方电网 2010 年数据, 采用 PSCAD/EMTDC 建立云广 ± 800 kV 特高压直流输电系统详细电磁暂态的仿真模型, 对三相接地故障激发的铁心饱和不稳定现象进行仿真试验, 以验证该新方法的正确性。

1 调制理论

1.1 调制理论的基本内容

根据换流器的工作原理，直流电压是通过控制晶闸管导通与闭锁对交流电压进行调制产生的；而交流电流是通过控制晶闸管导通与闭锁对直流电流进行调制得到的，所以换流器可以看成是一个调制器，交、直流电气量之间有如下的关系^[16]

$$\begin{cases} U_{dc} = u_a S_{ua} + u_b S_{ub} + u_c S_{uc} \\ i_a = i_{dc} S_{ia}, \quad i_b = i_{dc} S_{ib}, \quad i_c = i_{dc} S_{ic} \end{cases} \quad (1)$$

式中： U_{dc} 、 i_{dc} 分别是直流电压、直流电流， i_a 、 i_b 、 i_c 和 u_a 、 u_b 、 u_c 分别为三相交流电流、电压瞬时值； i_{dc} 为直流电流瞬时值； S_{ua} 、 S_{ub} 、 S_{uc} 分别为各相电压的开关函数； S_{ia} 、 S_{ib} 、 S_{ic} 为相应的电流开关函数。由于本文主要利用的是电流开关函数，因此下面仅给出电流开关函数的具体推导过程。

1.2 电流开关函数

现代高压直流输电系统中普遍采用等间隔触发方式，所以上述开关函数可以分解成较规范的傅里叶级数形式^[15]。

图 1 是一个六脉波换流器的开关函数，以 A 相为例，在忽略换相叠弧的情况下，电流和电压开关函数具有相同的图形，如图 1(a)所示，波形具有半波对称性，将其分解成傅里叶级数，得

$$\begin{cases} s_{ia} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t \\ s_{ib} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t - 2\pi/3) \\ s_{ic} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

式中： ω 为角速度； A_n 是把开关函数展开成傅里叶级数的系数，表达式如下

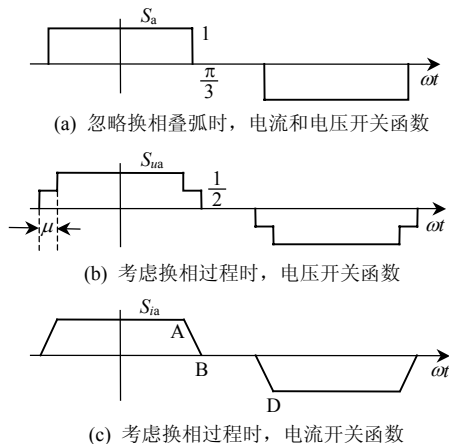


图 1 六脉波换流器的开关函数

Fig. 1 Switch function of 6-pulse converter

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3}} \cos(nx) dx + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} -\cos(nx) dx \right] = \frac{4}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{6} \quad (3)$$

$$\text{式中 } f(x) = \begin{cases} 1, & 0 < x < \frac{\pi}{3} \\ 0, & \frac{2\pi}{3} < x < \frac{2\pi}{3} \\ -1, & \frac{2\pi}{3} < x < \pi \end{cases}$$

考虑换相过程时，设换相角为 μ ，电压开关函数图形如图 1(b)所示，电流开关函数图形如图 1(c)所示，下面只给出电流开关函数的具体推导过程。在正常运行状况下典型的换相角为 $15^\circ \sim 25^\circ$ ^[1]，对换相过程线性化处理不会产生大的误差^[6]，所以电流开关函数波形依然是半波对称的，如图 1(c)所示。不妨设直线 AB 的数学表达式为

$$y_{AB} = -\frac{x}{\mu} + \frac{\pi}{3\mu} + \frac{1}{2} \quad (4)$$

直线 CD 的数学表达式为

$$y_{CD} = -\frac{x}{\mu} + \frac{2\pi}{3\mu} - \frac{1}{2} \quad (5)$$

则换相过程线性化电流开关函数的傅里叶系数为

$$\begin{aligned} A_{n\mu} &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \\ &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{3} - \frac{\mu}{2}} \cos(nx) dx + \int_{\frac{\pi}{3} - \frac{\mu}{2}}^{\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2}} y_{AB} \cos(nx) dx + \right. \\ &\quad \left. \int_{\frac{\pi}{3} + \frac{\mu}{2}}^{\pi} y_{CD} \cos(nx) dx + \int_{\frac{2\pi}{3} - \frac{\mu}{2}}^{\pi} -\cos(nx) dx \right] = \\ &= \frac{8}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \cos \frac{n\pi}{6} \cos \frac{n\mu}{2} \frac{\sin(n\mu/2)}{n\mu} \end{aligned} \quad (6)$$

用 $A_{n\mu}$ 代替式(2)中的 A_n 便得到换相过程线性化的电流开关函数。

2 铁心饱和和不稳定的新判据

2.1 铁心饱和和不稳定的形成机理

换流变压器铁心饱和和不稳定是在一定条件下，交流侧的二次谐波分量与其在直流侧引起的基频分量经过换流器的开关作用形成一正反馈闭环引起的，形成机理参见文献^[17]。

2.2 铁心饱和和不稳定新判据

由上述的形成机理可知，引起换流变压器铁心饱和和不稳定的最终原因是交流侧的直流分量激发了换流变压器铁心饱和，致使换流变压器向交流系

统注入大量的各次谐波,因此求得交流侧的直流分量 I_{acn} 就显得十分重要。

不妨设交流侧原来含有的直流分量为 I_{acn}^0 , 由直流侧基频分量在交流侧引起的直流分量为 I_{acn}' 。显然有

$$I_{acn} = I_{acn}^0 + I_{acn}' \quad (7)$$

由于各种各样的不对称,直流电流中包含了各次谐波分量,所以任一时刻直流侧的直流电流可以表示为^[7]

$$i_{dc} = I_{do} + \sum_{r=1}^{\infty} I_{dr} \cos(\omega_r t + \varphi_r) \quad (8)$$

式中: I_{do} 为理想直流电流; I_{dr} 、 ω_r 、 φ_r 分别为第 r 次谐波分量的幅值、角速度和相角。文献[7]中指出直流侧阻抗是时间的函数,那么式(8)中 φ_r 自然也是时间的函数。结合式(1)(2)(8)可得交流电流为(以 A 相不考虑换相过程为例)

$$\begin{aligned} i_a = i_{dc} S_{ia} = [I_{do} + \sum_{r=1}^{\infty} I_{dr} \cos(\omega_r t + \varphi_r)] S_{ia} = \\ I_{do} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t) + \\ \sum_{r=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{dr} A_n}{2} \{ \cos[(\omega_r + n\omega_0)t + \varphi_r] + \\ \cos[(\omega_r - n\omega_0)t + \varphi_r] \} \end{aligned} \quad (9)$$

式中 ω_0 为基频角速度。如果要考虑换相过程,只需用 $A_{n\mu}$ 代替式(9)中的 A_n 即可。

当 $\omega_r = \omega_0$ 时,由直流侧基频分量在交流侧引起的直流分量为

$$I_{acn}' = \frac{I_{d1}}{2} A_1 \cos(\varphi_r) \quad (10)$$

所以,交流侧的直流分量为

$$I_{acn} = I_{acn}^0 + \frac{I_{d1}}{2} A_1 \cos(\varphi_r) \quad (11)$$

式中 I_{d1} 是直流电流中基频谐波分量的幅值。

由式(11)可知,当 $\cos \varphi_r < 0$ 时, I_{acn} 是随时间而衰减的,不容易激发变压器铁心饱和进而导致谐波不稳定的发生,此时系统是稳定的;反之, $\cos \varphi_r > 0$ 时, I_{acn} 随时间而增大,此时若系统遭受外部扰动,便会激发铁心饱和和不稳定现象。本文把这种判断换流变压器铁心饱和和不稳定的新方法定义为 $\cos \varphi_r$ 判据。

3 $\cos \varphi_r$ 判据与饱和稳定因子的关系

文献[15]中求出交流侧直流分量表达式为

$$I_{acn} = I_{acn}^{t=0} e^{-(\alpha+j\beta)t} \quad (12)$$

式中参数请参见原文,并用 $\alpha < 0$ 作为铁心饱和和不稳定发生的判断标准,称之为饱和稳定因子 SSF。

对式(12)两端取模,可得

$$|I_{acn}| = |I_{acn}^{t=0} e^{-(\alpha+j\beta)t}| = I_{acn}^{t=0} e^{-\alpha t} \quad (13)$$

从式(13)不难发现,当 $\alpha < 0$ 时, $|I_{acn}|$ 随时间而增大;当 $\alpha > 0$ 时, $|I_{acn}|$ 随时间而减小。

不妨令式(11)等于式(13),则有

$$\alpha = -\frac{\ln(1+B \cos \varphi_r)}{t} \quad (14)$$

式中: $B = I_{dr} A_1 / (2I_{acn}^0)$, 系统在正常运行情况下显然有 $B > 0$, 则

$$\begin{aligned} \alpha < 0 &\Leftrightarrow \ln(1+B \cos \varphi_r) > 0 \\ &\Leftrightarrow 1+B \cos \varphi_r > 1 \Leftrightarrow \cos \varphi_r > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

同理

$$\begin{aligned} \alpha > 0 &\Leftrightarrow \ln(1+B \cos \varphi_r) < 0 \\ &\Leftrightarrow 1+B \cos \varphi_r < 1 \Leftrightarrow \cos \varphi_r < 0 \end{aligned} \quad (16)$$

比较 2 种判断方法可知,文献[12]提出饱和稳定因子判据与本文提出的 $\cos \varphi_r$ 判据在本质上是相通的,都是利用交流侧直流分量随时间的变化趋势作为铁心饱和和不稳定的判断依据,即若交流侧直流分量随时间而减小,系统是稳定的;反之则不稳定。

4 动态仿真

4.1 运行方式

本文模型考虑 2 种运行方式:

1) 方式一,金安桥电厂 1 台发电机运行,额定输出功率 600MW,通过 1 回 500kV 交流线路与楚雄换流站相连。直流系统按照 10%额定功率(500MW)、双极额定电压(± 800 kV)运行。送端交流滤波器配置为 1A1B,受端交流滤波器配置为 2A1B。其中:A 代表 A 型滤波器,调谐频率为 11 次和 24 次(基频 50Hz);B 为 B 型滤波器,调谐频率为 13 次和 36 次。

2) 方式二,直流双极降压至 70%额定电压(560kV)运行,其余设置同方式一。

4.2 仿真分析

故障仿真设置:总时间长 15.0s,故障设置在 3.0s 时,持续时间 0.2s,故障类型为交流母线三相接地瞬时短路故障,换流变压器的拐点电压设置为 1.17pu。

由于直流侧阻抗是随时间而变化的^[7],所以 i_{dr} 也是时变的,从理论上计算 i_{dr} 的值是非常困难的。本文采用 PSCAD/EMTDC 中的傅里叶分析模块取

出稳态条件下直流电流的基频分量进而求出 $\cos\varphi_r$ 。2种运行方式的 $\cos\varphi_r$ 值列于表1。

从表1中可以看出,方式一 $\cos\varphi_r$ 的值均为负,由2.2的分析可知,交流侧的直流分量 I_{acn} 是随时间而衰减的,不容易激发变压器铁心饱和进而导致谐波不稳定现象的发生,此时系统是稳定的;而方式二 $\cos\varphi_r$ 的值都为正,交流侧的直流分量 I_{acn} 随时间而增加,此时若系统遭受外部扰动时便会导致铁心饱和和不稳定现象的发生,图2~3所示的故障仿真结果也验证了这一点。

表1 2种运行方式的 $\cos\varphi_r$ 值

Tab. 1 The $\cos\varphi_r$ of two operation modes

时间/s	$\cos\varphi_r$	
	方式一	方式二
3	-0.82	0.28
3.5	-0.78	0.35
4	-0.74	0.4
4.5	-0.58	0.45
5	-0.62	0.5

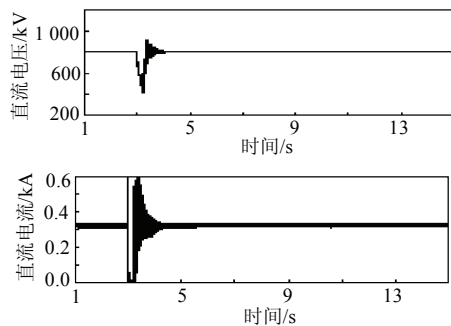


图2 方式一直流电压、电流仿真结果

Fig. 2 The DC voltage and current simulation results in mode I

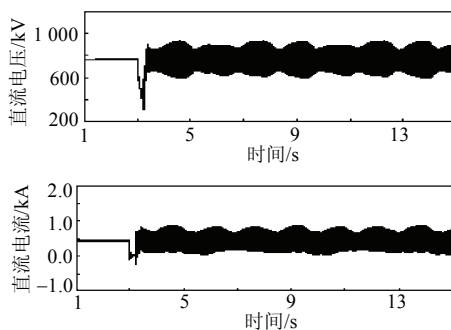


图3 方式二直流电压、电流仿真结果

Fig. 3 The DC voltage and current simulation results in mode II

图2是方式一直流电压、直流电流的仿真结果,从图中可以看到,3s时交流母线发生三相接地故障,直流电压和电流都迅速下降;3.2s故障消失后,直流电压和电流均随着时间而衰减,大约1s后系统恢复稳定运行。而图3是方式二直流电压、直流电流的仿真结果,从图中可以看到,3.2s故障消失

后,直流电压和电流并没有随着时间而衰减,而是持续振荡,说明三相接地故障激发了系统的换流变压器铁心饱和和不稳定现象^[17-18]。同时验证了用本文提出的判据 $\cos\varphi_r > 0$ 作为系统发生换流变压器铁心饱和和不稳定现象的判断依据是正确的。

5 结论

本文提出的 $\cos\varphi_r$ 判据实质上与饱和稳定因子判断方法是相通的,且 $\cos\varphi_r$ 判据在求饱和稳定因子时无需求取换流器两侧谐波关系矩阵,因此更易于实现。

参考文献

- [1] 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: 44-52.
- [2] 郝巍, 李兴源, 金小明, 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(in Chinese).
- [3] 谷毅, 赵玉柱, 张国威. 关于500 kV 东明开关站启动调试期间发生电压谐振的分析[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 71-74.
Gu Yi, Zhao Yuzhu, Zhang Guowei. Discussion on voltage resonance occurred in Bao-ren 500 kV transmission line during start up of Dongming switching station[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 71-74(in Chinese).
- [4] 毛晓明, 吴小晨. 南方交直流并联电网运行问题分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 6-13.
Mao Xiaoming, Wu Xiaochen. Analysis on operational problems in south China AC-DC hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 6-13(in Chinese).
- [5] 袁清云. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 1-3.
Yuan Qingyun. Present state and application prospect of ultra HVDC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 1-3(in Chinese).
- [6] Hu Lihua, Yacimini R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [7] Hu L, Yacimini R. Calculation of harmonics and interharmonics in HVDC schemes with low DC side impedance[J]. IEE Proceedings-C, 1993, 140(6): 469-476.
- [8] Hu Lihua, Yacimini R. Calculation of harmonic interference in HVDC systems with unbalance[C]. IEE Fourth International Conference on AC and DC Power Transmission, 1991: 390-394.
- [9] Hu Lihua, Morrison R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 973-979.
- [10] Ying Jiang, Ake E. General analysis of harmonic transfer through converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 12(2): 287-293.
- [11] Carbone R, Rosa F D, Langella R. A new approach to model AC/DC/AC conversion systems[C]. IEEE Power Engineering Society

- Summer Metting, 2001.
- [12] Yu Tao, Shi Dan, Ren Zhen, et al. Study on modeling of multi-harmonic sources in AC/DC hybrid transmission system [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Dalian, China, 2005.
- [13] Burton R S. Prediction of core saturation instability at an HVDC converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1961-1969.
- [14] Ainsworth J D. Core saturation instability in Kingsnorth HVDC link[C]. CIGRE Study Committee 14, Winnipeg, Canada, 1977.
- [15] Chen S, Wood A R, Arrillaga J. HVDC converter transformer core saturation instability: a frequency domain analysis[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 75-81.
- [16] Rashid M H, Maswood A I. Analysis of three phase AC/DC converters under unbalanced supply conditions[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1988, 24(3): 449-455.
- [17] 杨小兵, 李兴源, 金小明, 等. 云广特高压直流输电系统中换流变压器铁心饱和不稳定分析[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 5-9. Yang Xiaobing, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Analysis on converter transformer core saturation instability in UHVDC power transmission system from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 5-9(in Chinese).

- [18] 穆子龙, 李兴源, 金小明, 等. 云广特高压直流输电系统中换流变压器铁心饱和不稳定分析[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 8-14. Mu Zilong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Research on harmonic instability problem at sending end of UHVDC power transmission project from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 8-14(in Chinese).



杨小兵

收稿日期: 2008-12-01。

作者简介:

杨小兵(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: yahui_1983@163.com;

李兴源(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 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;

郝巍(1982—), 男, 助理工程师, 从事电力系统规划工作。

(编辑 褚晓杰)