

高压直流输电系统直流偏磁下的谐波不稳定判据研究

魏玥¹, 刘天琪¹, 晏小彬², 李兴源¹, 张洁¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 西南电力设计院, 四川 成都 610000)

摘要: 针对交直流互联输电系统的谐波不稳定问题, 推导出判断直流系统是否发生铁芯饱和谐波不稳定的工程判据。该判据从直流输电谐波不稳定机理出发, 计及直流偏磁铁芯饱和的影响, 利用换流变直流偏磁产生的正序二次谐波幅度高于其他各次谐波的特点, 整体考虑二次谐波通过换流器在交流系统和直流系统之间来回传递的全过程。算例分析建立了电磁暂态模型, 通过 PSCAD/EMTDC 进行仿真, 所得电磁暂态故障仿真的结果与基于新判据的频率扫描结果一致, 验证了工程判据的正确性与适用性。

关键词: 高压直流系统; 谐波不稳定; 二次谐波; 直流偏磁; 开关函数

Study of harmonic instability criterion under DC magnetic bias in HVDC system

WEI Yue¹, LIU Tian-qi¹, YAN Xiao-bin², LI Xing-yuan¹, ZHANG Jie¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Southwest Electric Power Design Institute, Chengdu 610000, China)

Abstract: For the harmonic instability problem in AC-DC interconnected transmission system, this paper deduces the criterion to determine whether the DC system occurs core saturation harmonic instability. From HVDC harmonic instability mechanism and considering the DC bias magnetic core saturation effects, the criterion makes use of the characteristic that positive sequence second harmonic amplitude is higher than the other harmonic generated in DC magnetic bias of converter transformer, takes into account the whole process that the second harmonic transfers between AC and DC systems back and forth through inverter overall. In the case analysis, electromagnetic transient model is established and simulated by PSCAD/EMTDC, the result of electromagnetic transient fault simulation is consistent with the result of frequency scanning method based on the new criterion, so the correctness and applicability of engineering criteria is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51037003).

Key words: high voltage direct current (HVDC) system; harmonic instability; second harmonic; DC magnetic bias; switch function

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0139-06

0 引言

与传统的高压交流输电技术相比, 直流输电具有异步联网、传输容量大、损耗低、潮流调节灵活、快速、限制短路电流、节省输电走廊、智能化程度高等优点, 是坚强智能电网极为重要的组成单元之一, 使其在远距离大容量输电以及异步联网工程中得到广泛应用^[1-3]。随着我国多条高压直流输电工程相继开工建设, 高压直流输电给送端交流系统带来的运行压力以及可能引发的一系列稳定性问题成为亟待研究与解决的重点, 其中, 高压直流输电

(HVDC) 送端换流器引起的谐波不稳定问题就是极其值得注意和需要进行深入研究的问题之一^[1-3]。

高压直流输电系统中的谐波不稳定现象是指在换流站附近有扰动时谐波放大的现象。换流器交流侧二次谐波分量和直流侧基频分量通过交直流系统间相互作用会引发一种谐波不稳定现象, 换流变压器的铁芯饱和会进一步加剧这种不稳定。流进换流变压器绕组的直流电流使变压器发生直流偏磁效应从而导致励磁电流含有大量的低次谐波, 其中二次谐波在谐波放大过程中起了关键作用^[4]。

现有的谐波不稳定研究方法主要包括: 小信号分析法^[5]、频域分析法^[6]、特征谐波潮流算法^[7-8]、经验模式分解法^[9]和时域仿真法^[10], 但这些方法大

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51037003)

都没有简便的判据进行谐波不稳定分析。文献[11]推导出了判据来进行谐波不稳定问题的研究,但其没有考虑变压器铁芯饱和的影响因素,在系统发生直流偏磁铁芯饱和的情况下不实用,具有一定局限性。

针对以上问题,本文从电路原理的角度出发,计及变压器铁芯饱和的影响,整体考虑谐波通过换流器在交流系统和直流系统之间来回传递的全过程以及换流变直流偏磁,充分利用换流变直流偏磁产生的二次谐波占主要成分,其幅度高于其它各次谐波的特点,推导出判断直流系统是否发生铁心饱和谐波不稳定的工程判据,并通过频率扫描法和电磁暂态故障仿真,验证了该工程判据的正确性和准确性。

1 直流输电谐波不稳定机理

交直流互联输电系统的谐波不稳定是一种特殊的电力系统稳定问题,表现为谐波振荡且不易衰减或放大的现象,如交流侧母线电压发生严重畸变,变压器中性点直流电流分量大幅上升^[1]。谐波通过换流器传递形成铁心饱和和不稳定机制的描述如图 1 所示^[12]。

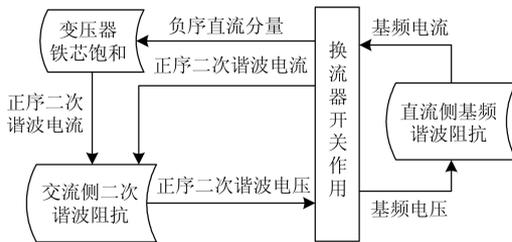


图 1 铁芯饱和谐波不稳定形成机理

Fig. 1 Mechanism of harmonic instability caused by core saturation

谐波谐振和不稳定问题的引发因素很多,在采用等间隔脉冲触发方式、交流母线三相电压对称、换流变压器三相参数对称等条件下,引起谐波不稳定的主要因素为变压器铁芯饱和及交直流侧谐波频率互补^[11,13]。

实际上,由于系统的品质因数 Q 的缘故,系统的谐振频率并不一定要精确到某一整数次谐波频率上,只要接近该整数次谐波频率,都可能引发同样的问题。在这种情况下,不论是在交流侧或直流侧的某一边单独发生的谐振还是在两边同时发生的互补谐振(后者可能情况会更严重),谐波激励源都将是已经饱和了的换流变压器,它可以向系统中注入大量各整数次谐波。

2 铁芯饱和谐波不稳定判据推导

2.1 开关函数理论

根据调制理论,直流电压就可以看成是三相交流电压经过开关函数调制而得,交流电流可以看成是直流电流经过开关函数调制而得^[14],有

$$\begin{cases} U_{dc} = U_a \cdot B_{ua} + U_b \cdot B_{ub} + U_c \cdot B_{uc} \\ i_a = i_{dc} \cdot B_{ia} \\ i_b = i_{dc} \cdot B_{ib} \\ i_c = i_{dc} \cdot B_{ic} \end{cases} \quad (1)$$

式中: B_{ia} 、 B_{ib} 、 B_{ic} 表示电流的开关函数; B_{ua} 、 B_{ub} 、 B_{uc} 表示 A、B、C 相对应电压的开关函数。6 脉波换流器的 A 相相对应的开关函数图形如图 2 所示。

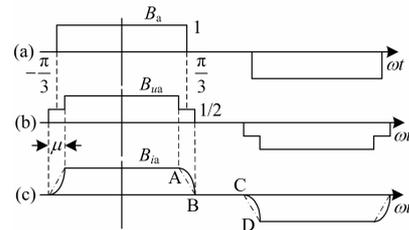


图 2 6 脉波换流器的开关函数

Fig. 2 Switch function of 6-pulse inverter

触发角一般都采用等间隔触发脉冲控制,开关函数用傅立叶级数可用式(2)表示。

$$\begin{cases} B_a = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega t \\ B_b = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t - 2\pi/3) \\ B_c = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

不考虑换相过程,电压和电流的开关函数具有相同形式,如图 2 (a) 所示。考虑换相过程,电压、电流的开关函数图形如图 2 (b)、图 2 (c) 所示,其傅里叶系数 A_{nu} 和 A_{ni} 的计算可参考文献[14]。

2.2 交直流调制作用

在分析换流器对谐波的调制作用时,通常做一些理想化的简化假设,可以简化对谐波主要成分的分析过程,并保留一定精度^[11]。假设条件如下:(1)换相电压三相对称,且不含任何谐波分量;(2)换流变压器的各相参数相同,保证三相对称;(3)触发角控制系统都采用等间隔触发脉冲控制。从而,可将换相电压表示为

$$\begin{cases} u_a = U_{am} \cos(\omega_m t + \alpha_{am}) \\ u_b = U_{bm} \cos(\omega_m t + \alpha_{bm}) \\ u_c = U_{cm} \cos(\omega_m t + \alpha_{cm}) \end{cases} \quad (3)$$

采用对称分量法重新表示式(3)中的三相电压, 将其代入式(1)中, 同时考虑换相叠弧角, 取其傅里叶分解的第1项, 可得交流侧正序电压分量通过换流器的调制作用传递到直流侧的电压分量为

$$\frac{3U_m^+}{2} A_u \cos[(\omega_m - \omega)t + \alpha_m^+] = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} \times U_m^+ \cos[(\omega_m - \omega)t + \alpha_m^+]$$

频率次数减1; 交流侧负序电压分量经换流器的调制作用传递到直流侧的电压分量为

$$\frac{3U_m^-}{2} A_u \cos[(\omega_m + \omega)t + \alpha_m^-] = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos \frac{\mu}{2} \times U_m^- \cos[(\omega_m + \omega)t + \alpha_m^-]$$

频率次数加1。显然, 两者具有相同的幅值, 均为 $\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times \cos \frac{\mu}{2} U_m$, 和频率次数没有关系。

对于换流器将谐波从直流侧调制到交流侧的过程, 考虑在直流电流上叠加某个小信号 i_d 为

$$i_d = I_{dm} \cos(\omega_d t + \varphi_d) \quad (4)$$

将式(4)代入开关函数定义式(1)中就可得到交流侧三相电流的表达式。对其进行傅里叶展开, 取第1项并化简, 可得

$$\begin{cases} i_a = \frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \cdot \mu} I_{dm} [\cos \alpha + \cos \beta] \\ i_b = \frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \cdot \mu} I_{dm} \left[\cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_c = \frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \cdot \mu} I_{dm} \left[\cos \left(\alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \cos \left(\beta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\alpha = (\omega_d + \omega)t + \varphi_d$; $\beta = (\omega_d - \omega)t + \varphi_d$ 。由式(5)可知, 直流侧谐波电流经过换流器调制到交流侧后, 交流侧正序谐波电流的频率次数加上1, 负序谐波电流的频率次数减去1, 两者具有相同的幅值, 都是 $\frac{\sqrt{3} \sin \mu}{\pi \cdot \mu} I_{dm}$, 和频率次数没有关系。

2.3 铁芯饱和谐波不稳定判据推导

根据以上对换流器交/直流侧之间谐波传递关系的分析, 先将直流侧谐波电流调制到交流侧, 再从交流侧调制回直流侧的全过程联系起来进行整体推导。

t 时刻, 直流侧谐波电流分量调制到交流侧。

$$\begin{cases} |I_{ac(n+1)}^+(t)| = \frac{\sqrt{3}}{\pi} |I_{dcn}(t)| \\ |I_{ac(n-1)}^-(t)| = \frac{\sqrt{3}}{\pi} |I_{dcn}(t)| \end{cases} \quad (6)$$

式中: $I_{ac(n+1)}^+(t)$ 为 t 时刻交流侧 $(n+1)$ 次正序谐波电流; $I_{ac(n-1)}^-(t)$ 为 t 时刻交流侧 $(n-1)$ 次负序谐波电流; $I_{dcn}(t)$ 为 t 时刻直流侧 n 次谐波电流。则有

$$\begin{cases} |U_{ac(n+1)}^+(t)| = \frac{\sqrt{3}}{\pi} |I_{dcn}(t)| \cdot |Z_{ac(n+1)}^+| \\ |U_{ac(n-1)}^-(t)| = \frac{\sqrt{3}}{\pi} |I_{dcn}(t)| \cdot |Z_{ac(n-1)}^-| \end{cases} \quad (7)$$

式中: $U_{ac(n+1)}^+(t)$ 为 t 时刻交流侧 $(n+1)$ 次正序谐波电压; $U_{ac(n-1)}^-(t)$ 为 t 时刻交流侧 $(n-1)$ 次负序谐波电压; $Z_{ac(n+1)}^+$ 为交流系统侧 $(n+1)$ 次正序谐波阻抗; $Z_{ac(n-1)}^-$ 为交流系统侧 $(n-1)$ 次负序谐波阻抗。这里交流系统侧的谐波阻抗是指从换流变压器阀侧得到的交流系统的谐波阻抗。

研究表明, 换流变直流偏磁产生的二次谐波占主要成分, 其幅度要高于其他各次谐波, 与注入直流电流呈线性关系^[5,15], 并结合图1所示的谐波传递过程, 可通过研究二次谐波的传递变化, 推导系统是否发生谐波不稳定的判据。二次谐波分量包含直流转换相关分量和谐波电流产生的相关分量。考虑变压器铁芯饱和, 计二次谐波分量与直流电流的比值为 k , 其值与变压器拐点、运行方式有一定关系, 文献[5]研究表明在最恶劣的情况下 k 依然是小于1的。出于最保守的考虑, 不计直流偏磁产生的二次谐波电流与换流变调制产生的二次谐波电流间的相位差, 系数 k 取为1。交流侧二次谐波电压分量可以表示为

$$\begin{cases} |I_{ac(2)}(t)| = k \cdot |I_{ac(0)}(t)| + |I_{ac(2)}^+(t)| = \\ k \cdot |I_{ac(0)}(t)| + \frac{\sqrt{3}}{\pi} |I_{dc1}(t)| = (1+k) \frac{\sqrt{3}}{\pi} |I_{dc1}(t)| \\ |U_{ac(2)}(t)| = |I_{ac(2)}(t)| \cdot |Z_{ac(2)}^+| = \\ \frac{(1+k)\sqrt{3}}{\pi} |I_{dc1}(t)| \cdot |Z_{ac(2)}^+| \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为换流变二次谐波分量与直流电流的比值;

$I_{ac(2)}(t)$ 为考虑了直流偏磁效应后交流侧 t 时刻的二次谐波分量; $I_{ac(0)}(t)$ 为交流侧 t 时刻的直流分量; $U_{ac(2)}(t)$ 为 t 时刻的二次谐波电压分量。

Δt 时刻后, 二次谐波从交流侧调制回直流侧, 有

$$\begin{aligned} |U_{dc1}(t+\Delta t)| &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} |U_{ac(2)}(t)| = \\ & \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \times \frac{(1+k)\sqrt{3}}{\pi} |I_{dc1}(t)| \cdot |Z_{ac(2)}^+| \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $U_{dc1}(t+\Delta t)$ 为 $(t+\Delta t)$ 时刻由交流侧二次谐波电压通过调制后在直流侧产生的基频谐波电压。从而有

$$|I_{dc1}(t+\Delta t)| = \frac{|U_{dc1}(t+\Delta t)|}{|Z_{dc1}|} = \frac{9(1+k)}{\pi^2} \times \frac{|I_{dc1}(t)| \cdot |Z_{ac(2)}^+|}{|Z_{dc1}|} \quad (10)$$

式中: Z_{dc1} 为平波电抗器的阀侧端口等效的基频谐波阻抗; $I_{dc1}(t+\Delta t)$ 表示 $(t+\Delta t)$ 时刻由 $U_{dc1}(t+\Delta t)$ 产生的直流电流基频谐波分量。 k 值取 1 时对谐波的发展趋势做初步评估, 式 (10) 可变为

$$|I_{dc1}(t+\Delta t)| = \frac{18}{\pi^2} \times \frac{|Z_{ac(2)}^+| \cdot |I_{dc1}(t)|}{|Z_{dc1}|} \quad (11)$$

式中, $I_{dc1}(t+\Delta t)$ 表示 $(t+\Delta t)$ 时刻直流电流总的基频次谐波分量。即

$$\frac{|I_{dc1}(t+\Delta t)|}{|I_{dc1}(t)|} = \frac{18}{\pi^2} \times \frac{|Z_{ac(2)}^+|}{|Z_{dc1}|} \quad (12)$$

如果 $\frac{|I_{dc1}(t+\Delta t)|}{|I_{dc1}(t)|} \geq 1$, 则表明系统不稳定, 谐波不稳定现象可能会被激发。所以评估单回直流输电系统发生谐波不稳定的工程判据是

$$\left| Z_{ac(2)}^+ \right| - \frac{\pi^2}{18} |Z_{dc1}| \geq 0 \quad (13)$$

判据值用 γ 表示, 设 $\gamma = \left| Z_{ac(2)}^+ \right| - \frac{\pi^2}{18} |Z_{dc1}|$ 。该工程判据偏保守, 所以采用电磁暂态故障仿真来校核该工程判据得到的不稳定结论。

3 算例

3.1 电磁暂态模型的建立

Burton1994 年提出只含整流器的直流模型研究直流的谐波问题, S.Chen 对 Burton 的模型进行了改进^[16], 将直流侧的电流源改为电压源, 整流器由定触发角控制改为定电流控制, 故建立只含整流器的

直流模型, 如图 3 所示。测试系统的各参数参照表 1, 交流电源电压基准为 100 kV, 直流侧直流电压为 100 kV, 整流器的控制方式采用 Cigre 定电流控制。

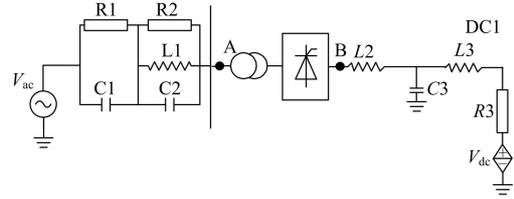


图 3 只含整流器的直流模型

Fig. 3 Model containing only the DC rectifier

表 1 算例参数设置

Table 1 Parameter setting of examples				
参数	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
R1/ Ω	30	30	30	50
R2/ Ω	301.2	301.2	301.2	501.2
R3/ Ω	1	1	1	1
C1/ μF	1 200	1 200	1 200	1 200
C2/ μF	397.49	397.49	397.49	397.49
C3/ μF	22.066	22.066	22.066	22.066
L1/mH	6.347	6.347	6.347	6.347
L2/mH	400	600	700	600
L3/mH	918	918	918	918

3.2 基于新工程判据的风险评估

在系统稳定的前提下, 进行动态的频率扫描分析, 以获得送端系统的交/直流阻抗——频率特性。根据式 (13) 计算所得判据值如表 2 所示。

表 2 4 个算例的铁心饱和谐波不稳定风险评估比较

Table 2 Assessment and comparison of harmonic instability risk caused by core saturation of 4 examples

运行方式	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
判据 γ	-38.3	-4.0	6.6	23.9

由表 2 可看出, 算例 1、算例 2 的判据值小于 0, 没有发生铁心饱和谐波不稳定的风险, 算例 3、4 的判据值大于 0, 有发生铁心饱和谐波不稳定的风险, 且判据值越大, 风险越高, 值越小, 风险越低。在换流变直流偏磁的情况下, 采用此判据判断谐波是否发生不稳定非常便捷、可靠, 以下采用时域仿真进一步验证。

3.3 故障时域仿真分析

为了验证频率扫描分析所得结论, 在交流侧设置单瞬短路故障以激发换流变铁心饱和, 进行故障时域仿真分析。故障设置的时序为: 2 s 时线路单相

故障, 2.1 s 故障恢复。4 个算例的电磁暂态计算结果如图 4~图 7 所示。

算例 1 和算例 2 在扰动后没有出现铁心饱和谐波不稳定现象, 符合预期结果; 算例 3 和算例 4 在扰动后发铁心饱和谐波不稳定, 也符合预期结果。仿真结果证明了判据的正确性。应注意: 在计算过程中系数 k 的取值为 1, 本判据有一定的保守性, 在实际应用时, k 值应该根据实际情况取用, 将会进一步提高该判据的准确性。

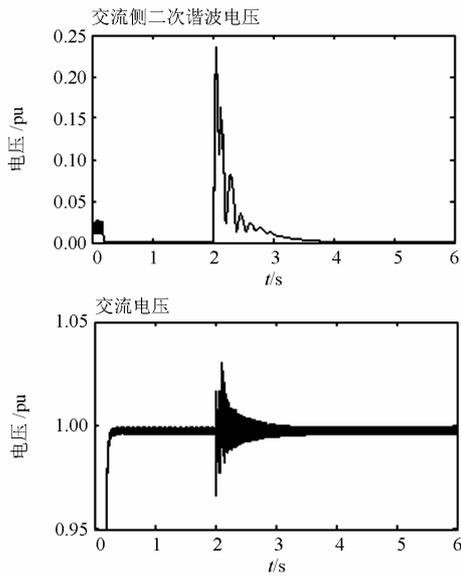


图 4 算例 1 的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of example 1

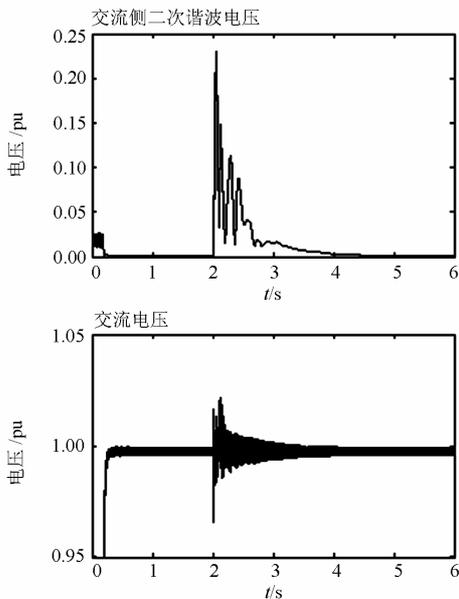


图 5 算例 2 的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of example 2

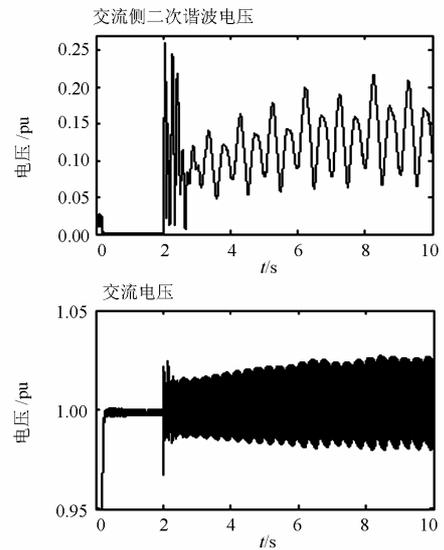


图 6 算例 3 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of example 3

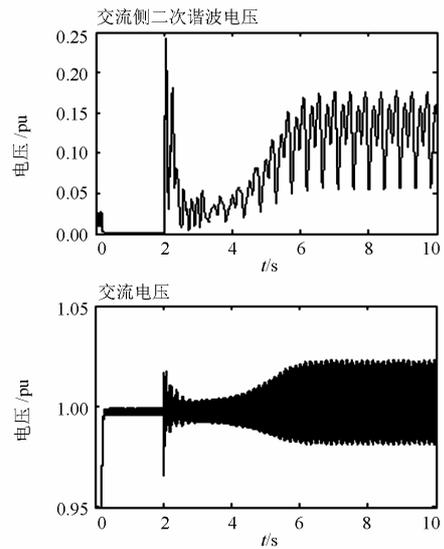


图 7 算例 4 的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of example 4

4 结论

对直流输电系统中的谐波不稳定问题, 从直流输电谐波不稳定机理出发, 计及变压器铁芯饱和的影响因素, 整体考虑谐波通过换流器在交流系统和直流系统之间来回传递的全过程以及换流变直流偏磁, 利用换流变直流偏磁产生的二次谐波幅度要高于其他各次谐波的特点, 推导出判断直流系统是否发生铁芯饱和谐波不稳定的工程判据。通过频率扫描法和电磁暂态故障仿真, 对比校验了判据的正确性与适用性。根据计算所得工程判据的判据值大小, 可评估系统发生谐波不稳定风险的大小, 判据值大

于0, 系统有发生谐波不稳定的风险, 判据值越大, 风险越高, 值越小, 风险越低。判据值 γ 的大小, 可以指导实际工程采取相适应的谐波抑制措施, 具有很强的实用性和推广性。

参考文献

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 李兴源, 赵睿, 刘天琪. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
LI Xing-yuan, ZHAO Rui, LIU Tian-qi. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [3] 乔小敏, 王增平, 文俊. 高压直流输电中谐波对换流变压器差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 111-114.
QIAO Xiao-min, WANG Zeng-ping, WEN Jun. Influence of converter transformer differential protection by harmonic in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 111-114.
- [4] 陈浩, 李琳, 许正梅. 换流变压器铁心饱和型不稳定性预测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 108-113.
CHEN Hao, LI Lin, XU Zheng-mei. Prediction of core saturation instability at converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 108-113.
- [5] HASEGAWA T, MATSUSHITA J, OUE Y, et al. Screening for HVDC system core saturation instability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1291-1297.
- [6] 孙媛媛, 尹志明, 郑伟杰. 晶闸管可控电抗器的谐波产生特性研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 267-273.
SUN Yuan-yuan, YIN Zhi-ming, ZHENG Wei-jie. Study of the harmonic producing characteristics of the thyristor controlled reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 267-273.
- [7] 马俊民, 黄永瑞, 何青连. 800 kV 特高压直流输电系统谐波研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 33-37.
MA Jun-min, HUANG Yong-rui, HE Qing-lian. Research on harmonics of 800 kV ultra voltage direct current transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 33-37.
- [8] 徐宏雷, 郑伟, 周喜超. 特高压直流输电系统对电网谐波污染的仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 192-195.
XU Hong-lei, ZHENG Wei, ZHOU Xi-chao. Simulation analysis of grid harmonic pollution affected by ultra high voltage direct current power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 192-195.
- [9] 杨晓萍, 刘普森, 钟彦儒. 基于经验模式分解的有源滤波器谐波检测[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 197-202.
YANG Xiao-ping, LIU Pu-sen, ZHONG Yan-ru. Harmonic detection of active power filter based on empirical mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 197-202.
- [10] LOUIE K W, WILSON P, WACHAL R W, et al. HVDC power system harmonic analysis in the time and frequency domains[J]. International Conference on Power System Technology, 2006: 1-8.
- [11] 樊丽娟, 穆子龙, 金小明, 等. 高压直流输电系统送端谐波不稳定问题的判据[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 62-68.
FAN Li-juan, MU Zi-long, JIN Xiao-ming, et al. Criterion of harmonic instability at sending end of HVDC power transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 62-68.
- [12] 晏小彬, 刘天琪, 李兴源, 等. 送端多直流落点谐波耦合引发铁芯饱和和不稳定的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 1-7.
YAN Xiao-bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Research on core saturation instability caused by harmonic coupling in multi-infeed HVDC on the sending end[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 1-7.
- [13] 陈宝亮, 李兴源, 穆子龙. 高压直流输电中混合谐振型谐波不稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 81-85.
CHEN Bao-liang, LI Xing-yuan, MU Zi-long. Analysis on composite resonant instability for HVDC power transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 81-85.
- [14] 杨小兵, 李兴源. 基于换相过程线性化的电流开关函数分析偏差研究[J]. 四川电力技术, 2008, 31(5): 20-23.
YANG Xiao-bing, LI Xing-yuan. Current switching function analysis deviation based on commutation Linearization[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31(5): 20-23.
- [15] 张海凤, 朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的影响[J]. 继电器, 2007, 35(15): 24-27.
ZHANG Hai-feng, ZHU Tao-xi. Influence of rectifier AC fault on HVDC transmission system[J]. Relay, 2007, 35(15): 24-27.
- [16] CHEN S, WOOD A R, ARRILLAGA J. HVDC converter transformer core saturation instability: a frequency domain analysis[J]. IEEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1996, 143(1): 75-81.

收稿日期: 2013-11-27; 修回日期: 2014-02-23

作者简介:

魏 玥 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析计算及稳定; E-mail: weiyunye@163.com

刘天琪 (1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电和调度自动化;

晏小彬 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。