

# 高压直流与含串补交流系统次/超同步铁磁谐振机理与解决措施

赵晓斌<sup>1,2</sup>, 谢小荣<sup>2</sup>, 李岩<sup>1</sup>, 邹常跃<sup>1</sup>, 辛清明<sup>1</sup>

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司 直流输电技术国家重点实验室, 广东 广州 510663;

2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**结合2017年5月29日富宁站换相失败恢复过程中发生的次/超同步铁磁谐振现象,通过理论分析和仿真验证明确了高压直流与含串补交流系统发生次/超同步铁磁谐振的原因。含串补交流系统在次同步谐波下阻抗幅值大幅增加,次同步频率谐波与其互补频率谐波之间的耦合作用增强;利用奈奎斯特稳定判据对交直流系统的阻抗进行分析,考虑串补后交直流系统的稳定性下降但仍然是稳定的。次同步频率谐波的存在易使变压器铁芯饱和,使系统稳定性进一步下降。理论分析和仿真结果表明,发生大扰动后,在换流器调制和变压器铁芯饱和2种非线性因素的作用下,交直流系统出现次/超同步的铁磁谐振现象,串补和交流滤波器相配合可以有效抑制这一类型的谐振。

**关键词:**高压直流输电;串补;次/超同步频率谐波;铁磁谐振;变压器饱和

**中图分类号:**TM 721.1

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202105006

## 0 引言

对于接入高压直流输电工程的弱交流系统而言,使用串补来增加系统的短路容量相比增加线路具有更明显的经济优势<sup>[1-3]</sup>。随着电网规模的不断扩大,不同区域电网之间采用异步互联的趋势越来越明显,2个区域电网之间的解列位置通常选取网架比较薄弱的地区<sup>[4-6]</sup>。使用串补可加强电网结构,提高短路比,增加直流工程的输送能力。

南方电网的永富直流工程和鲁西直流工程均使用串补来优化加强网架结构。2017年5月29日远区接地故障导致永富直流富宁换流站发生双极换相失败,进而引发谐波振荡现象,交流母线电压频谱特征与不含串补交流系统存在明显差异,含有总谐波畸变率约为11%的105.5 Hz谐波分量和总谐波畸变率约为4%的5.5 Hz次同步频率谐波分量。

通常高压系统中的间谐波含量极低,因此在交直流谐波不稳定的研究中主要考虑整数次谐波,特别是交流侧的2次谐波与直流侧的工频分量之间的相互耦合<sup>[7-10]</sup>;对于变压器铁芯的非线性的影响也主要是考虑在直流偏磁电流作用下产生2次谐波的作用<sup>[11-13]</sup>。对于含串补的交流系统而言,在大扰动的恢复过程中,由于串补电容在低频下呈现高容抗的特性,其对交直流系统间的谐波不稳定特性产生明

显的影响,仅考虑直流偏磁电流对变压器饱和特性的影响也难以分析含串补系统的谐波不稳定性。

首先分析了含串补交流系统的基本特性和串补对交直流谐波不稳定性的影响,以及在次谐波作用下变压器励磁电流频谱变化的特征和机理,在此基础上分析了含串补交流系统发生谐波不稳定现象的关键影响因素,并给出了经工程验证的解决措施。

## 1 永富直流“5·29”现场波形分析

云南永仁至富宁±500 kV直流输变电工程额定电压为500 kV,额定功率为3 000 MW,受端富宁换流站在正常运行时通过2条含串补的线路接入广西电网。2017年5月29日广西境内220 kV系统发生接地故障引起富宁站内发生换相失败,进而发生谐波振荡的事件,事件发生前直流输送功率为1 400 MW,投入6组容量为110 Mvar的交流滤波器(ACF)。

附录中图A1、A2分别为事件发生过程中交流母线电压和直流电压、电流。图1为交流电压 $U_{ac}$ 、直流电压 $U_{dc}$ 的频谱分析结果,图中 $U_{ac}$ 、 $U_{dc}$ 均为标么值。

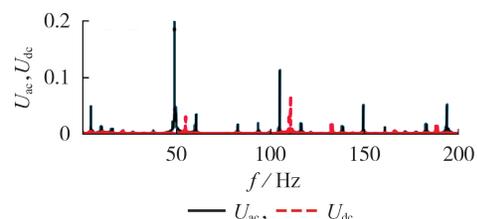


图1 交、直流电压频谱分析

Fig.1 Spectrum analysis of AC and DC voltages

在广西侧220 kV系统发生接地故障期间,交流母线电压有所下降,但波形基本稳定。极1和极2相

收稿日期:2020-08-22;修回日期:2021-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51537007);中国南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180617)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51537007) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (ZBKJXM20180617)

继发生换相失败后,对于受端交流系统类似于甩负荷,交流母线电压出现过电压以及严重畸变。换相失败恢复后,交流系统电压仍然存在持续的、稳定的谐波,即发生谐波振荡现象。交流电压中的主要谐波分量为5.5 Hz(负序)、61 Hz(负序)、105.5 Hz(正序)、150 Hz(零序)和194.5 Hz(负序),直流电压中的主要谐波分量为55.5 Hz和111 Hz。

## 2 含串补交直流系统的基本特性和谐波稳定性分析

### 2.1 换流器调制互补频率谐波耦合机理

基于晶闸管的高压直流输电工程所使用的换流器基本单元为6脉动换流器。换流器的每个桥臂类似开关,导通时逻辑为“1”,关断时逻辑为“0”。直流电压可以看作三相交流电压经开关函数调制得到,交流电流可以看作由直流电流调制得到。

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

其中, $i_{dc}$ 为直流电流; $S_{ua}$ 、 $S_{ub}$ 、 $S_{uc}$ 和 $S_{ia}$ 、 $S_{ib}$ 、 $S_{ic}$ 分别为三相交流电压和三相交流电流的开关函数; $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 和 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 分别为三相交流电压和三相交流电流。

不考虑换流器的换相过程,将某频率交流正序或者负序谐波电压分量代入式(1),取开关函数傅里叶级数展开式的首项并忽略其他项,可得:

$$U_{dc}^+ = 3\sqrt{3} U_m^+ \cos[(\omega_1 - \omega_0)t + \alpha] / \pi \quad (2)$$

$$U_{dc}^- = 3\sqrt{3} U_m^- \cos[(\omega_1 + \omega_0)t + \alpha] / \pi \quad (3)$$

其中, $\omega_1$ 、 $\omega_0$ 分别为谐波电压的角频率、交流基波电压的角频率; $\alpha$ 为交流基波电压与谐波电压的相位差; $U_{dc}^+$ 、 $U_{dc}^-$ 分别为幅值为 $U_m$ 的正、负序谐波电压 $U_m^+$ 、 $U_m^-$ 在直流侧产生的谐波电压。

设直流侧电流除直流分量外存在以下谐波分量:

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

其中, $I_{dm}$ 、 $\omega_d$ 、 $\varphi_d$ 分别为直流谐波侧某频率电流的幅值、角频率和相位。根据式(1)可分别计算出三相交流电流,取展开式的首项并忽略其他项,则:

$$\begin{cases} i_a = 3\sqrt{3} I_{dm} \left\{ \cos[(\omega_d + \omega_0)t + \varphi_d] + \cos[(\omega_d - \omega_0)t + \varphi_d] \right\} / (2\pi) \\ i_b = 3\sqrt{3} I_{dm} \left\{ \cos[(\omega_d + \omega_0)t + \varphi_d - 2\pi/3] + \cos[(\omega_d - \omega_0)t + \varphi_d + 2\pi/3] \right\} / (2\pi) \\ i_c = 3\sqrt{3} I_{dm} \left\{ \cos[(\omega_d + \omega_0)t + \varphi_d + 2\pi/3] + \cos[(\omega_d - \omega_0)t + \varphi_d - 2\pi/3] \right\} / (2\pi) \end{cases} \quad (5)$$

根据式(2)、式(3)和式(5)可知,经过换流器的调制作用,存在某一正序或者负序谐波电压或电流分量激发出另外一个频率谐波电压或电流分量的情况,即镜像频率效应<sup>[14]</sup>,或者说2个频率互补。经高压直流换流器耦合的2个谐波频率 $f_1$ 、 $f_2$ 之和满足如下关系式:

$$f_1 + f_2 = 2f_0 \quad (6)$$

其中, $f_0$ 为交流系统基波频率。

### 2.2 交、直流阻抗特性和谐波稳定性分析

#### 2.2.1 交流阻抗特性分析

与交流变电站不同,换流站内含有大量的容性无功补偿装置。由于滤除特征次谐波的需要,这些容性无功补偿设备的调谐频率通常较高,其中首个调谐频率以下交流母线对地阻抗呈容性,并且随着直流功率的变化进行频繁投切,这使得交流母线对地阻抗随滤波器的投切变化<sup>[15-16]</sup>。由于串补在低频下的高阻特征,含串补交流系统将引入新的特性。

为了对比含串补和不含串补系统的交直流阻抗特性,按照交流系统短路容量不变的原则,分析串补对交流系统阻抗特性的影响。使用PSCAD提供的CIGRE HVDC Benchmark模型开展阻抗特性对比分析,模型基本结构如附录中图A3所示,该模型设置的额定电压为500 kV、额定功率为1000 MW。Benchmark模型中整流站的交流滤波器配置和电源设置分别见附录中图A4、A5。

当研究交流系统阻抗特性时,通常将直流系统当作谐波电流源处理,故分析交流系统阻抗时取换流器闭锁状态下交流母线对地阻抗。图2为含串补、不含串补交流系统在直流系统闭锁情况下,整流站交流母线对地的正、负序谐波阻抗。含串补交流系统相比不含串补交流系统,其在低频下阻抗幅值大幅增加,在短路容量相当的情况下其他频率的阻抗特性与不含串补交流系统基本相同。由于含串补交流系统在低频下阻抗大幅度增加,低频率次谐波与100 Hz附近的超同步谐波之间的耦合作用将加强。

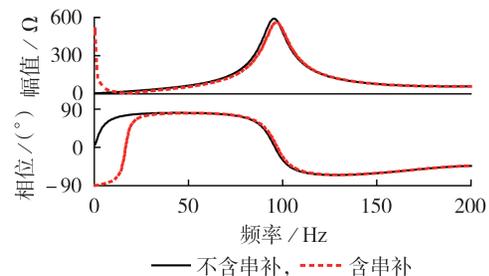


图2 含串补与不含串补交流系统阻抗-频率特性曲线  
Fig.2 Impedance-frequency characteristic curve of AC system with and without series compensation

#### 2.2.2 直流回路阻抗特性分析

分析直流回路阻抗特性时,通常将换流器当作

谐波电压源处理,换流变压器的阻抗和交流系统的阻抗可看作电压源的内阻抗,平波电抗器、直流线路和对侧换流站可看作谐波负载,因此在分析直流回路的频率阻抗特性时必须计及换流变压器和交流系统的影响。

图3给出了不含串补和含串补2种情况下直流回路的阻抗特性。由图可知,在绝大多数频率范围内,2个系统的阻抗特性基本相同,但在50 Hz附近受交流串补的影响,直流回路的阻抗幅值和相位有明显的变化。

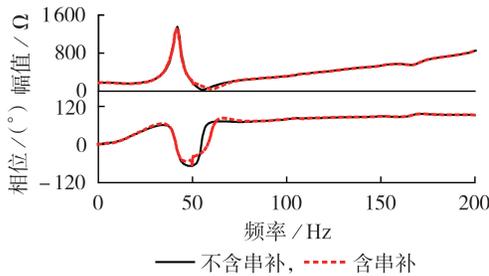


图3 含串补与不含串补直流回路阻抗-频率特性曲线  
Fig.3 Impedance-frequency characteristic curve of DC circuit with and without series compensation

### 2.2.3 谐波稳定性分析

交直流系统稳定性分析回路如图4所示。图中, $U_{ac}$ 、 $I_{ac}$ 分别为系统扰动电压、扰动产生的电流; $Z_{ac}$ 为交流系统在某一频率下的阻抗; $Z_{dc}$ 为 $Z_{ac}$ 对应的互补频率经直流调制后等效的交流侧阻抗。

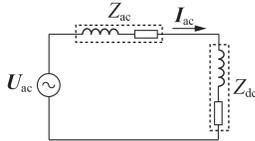


图4 交直流系统稳定性分析回路示意图  
Fig.4 Schematic diagram of stability analysis circuit of AC and DC system

由电路原理可知:

$$I_{ac} = \frac{U_{ac}}{Z_{ac} + Z_{dc}} = \frac{U_{ac}}{Z_{dc}(1 + Z_{ac}/Z_{dc})} \quad (7)$$

根据奈奎斯特稳定判据,闭环系统的稳定性可以根据开环函数 $G_{open}$ 的特性进行分析,则根据式(8)分析图4所示系统的稳定性。

$$G_{open} = Z_{ac}/Z_{dc} \quad (8)$$

由于互补效应的存在,系统的阻抗还受互补频率阻抗的影响。为了排除互补频率阻抗的相互影响,采用如下方法计算 $Z_{ac}$ 和 $Z_{dc}$ :①取直流系统闭锁情况下交流系统(含交流滤波器)的阻抗,记为 $Z_{ac}$ ;②在直流系统运行的情况下,采用小信号分析法在向交流母线注入一个正序或者负序的某频率下谐波电流,并根据测得的母线该频率的对地电压计算出等效的阻抗,记为 $Z_p$ ;③记施加的谐波频率对应互补

频率的阻抗经直流调制后反应在直流母线上的等效阻抗为 $Z_{dc}$ ,则可根据式(9)计算出 $Z_{dc}$ 。

$$Z_{dc} = Z_{ac} Z_p / (Z_{ac} - Z_p) \quad (9)$$

图5给出了不含串补和含串补2种情况下交流阻抗和等值直流阻抗比值函数随频率变化的曲线。由图可知,2种情况下系统都是稳定的,但在频率较低的情况下含串补交流系统的稳定裕度减小。

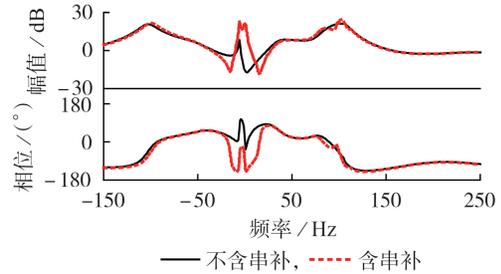


图5 谐波稳定性分析图

Fig.5 Diagram of harmonic stability analysis

### 2.3 计及变压器铁芯饱和特性的谐波稳定性

基于2.2.3节分析,当不考虑变压器铁芯饱和特性影响时,在交流系统中引入串补会降低系统的稳定裕度,但系统仍然是稳定的。变压器铁芯的非线性是影响谐波稳定性的关键因素。

#### 2.3.1 次谐波对变压器励磁电流调制机理

较低频率的次谐波作用下,由于每个工频周期内的磁通偏移量不同,每个工频周期内次谐波产生磁通类似于不同幅值直流偏磁电流和基波共同作用下的磁通,使得励磁电流的正负半波不对称,从而产生偶数次谐波。每个工频周期内磁通偏置的程度不同,进而使得每个工频周期内偶数次谐波电流的幅值不同,类似于双边带调幅。变压器次谐波产生的磁通为:

$$b_{sub}(t) = B_{sub} \cos(\omega_{sub}t + \varphi_{sub}) \quad (10)$$

其中, $\omega_{sub} = 2\pi f_{sub}$ , $f_{sub}$ 为次谐波频率; $\varphi_{sub}$ 为次谐波磁通的初始相位; $B_{sub}$ 为次谐波电压产生磁通的最大值。

根据调制理论,将次谐波作为调制波,各次谐波作为载波,以2次谐波为例,次谐波作用下最大等值直流电流分量产生的2次谐波电流为:

$$i_2(t) = I_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_0) \quad (11)$$

其中, $I_2$ 为次谐波产生最大磁通偏置时产生的励磁电流中对应的2次谐波电流值; $\omega_0 = 2\pi f_0$ , $f_0$ 为基波频率; $\varphi_0$ 为基波励磁电流的初始相位。

调制后的2次谐波电流表达式为:

$$i_{AM2}(t) = k_2 B_{sub} \cos(\omega_{sub}t + \varphi_{sub}) I_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_0) = 0.5k_2 B_{sub} I_2 \cos[(2\omega_0 + \omega_{sub})t + \varphi_0 + \varphi_{sub}] + 0.5k_2 B_{sub} I_2 \cos[(2\omega_0 - \omega_{sub})t + \varphi_0 - \varphi_{sub}] \quad (12)$$

其中, $k_2$ 为次谐波产生的磁通变化导致的励磁电流

中2次谐波变化的系数。根据式(12),可认为在次谐波作用下变压器产生的励磁涌流的偶数次谐波频率将发生迁移,产生2个幅值相等、与原偶数次谐波频差为次谐波的频率电流分量。

由于变压器铁芯磁化特性曲线的非线性,即磁导率的非线性,励磁电流中存在奇数次谐波,则可认为在次谐波作用下磁通对变压器的饱和程度进行调制,同时也对各次励磁电流进行调制,即进行了2次调制过程。以工频励磁电流为例,工频励磁电流及工频励磁谐波电流表达式分别为:

$$i_1(t) = I_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} i_{AM1}(t) = & k_1 B_{sub} \cos^2(\omega_{sub} t + \varphi_{sub}) I_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ & 0.5 k_1 B_{sub} I_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \\ & 0.25 k_1 B_{sub} I_1 \left\{ \cos[(\omega_0 + 2\omega_{sub})t + \varphi_0 + 2\varphi_{sub}] + \right. \\ & \left. \cos[(\omega_0 - 2\omega_{sub})t + \varphi_0 - 2\varphi_{sub}] \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $k_1$  为次谐波产生的磁通变化导致的励磁电流中工频分量变化的系数。对于奇数次的励磁电流,在次谐波的作用下将产生2个边频带,频率为与原奇数次谐波频率相差2倍的次谐波频率,2个边频带的幅值约为奇数次励磁电流的1/2。

利用PSCAD中提供的变压器经典模型进行仿真分析,在经典模型中使用补偿电流法模拟变压器铁芯的饱和特性。图6给出了考虑额定电压3%的5 Hz次谐波电压分量和额定基波电压的共同作用下的励磁电流的相位和幅值。基波电压的相位为 $0^\circ$ ,5 Hz次谐波电压的初始相位为 $30^\circ$ ,励磁电流中的谐波分量满足式(12)和式(14)的关系。

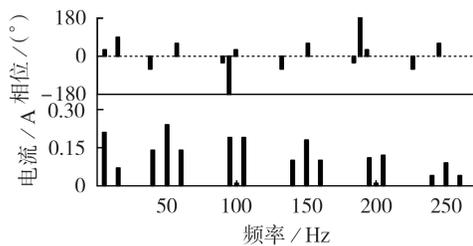


图6 励磁电流相位和幅值

Fig.6 Phase and amplitude of excitation current

### 2.3.2 换流器和变压器铁芯共同调制基本特性分析

暂态冲击过程中谐波是全频域的,因此分析了正、负、零序次谐波及其在变压器铁芯非线性调制下产生的主要谐波相序关系。根据式(12)、(14),正、负、零序次谐波下产生的主要谐波频率及其在变压器铁芯上产生谐波电流的相序如表1所示。

零序次谐波产生的主要谐波频率中具有互补效应的主要谐波频率为负序 $f_0 + 2f_{sub}$ 和正序 $3f_0 + 2f_{sub}$ 。正序次谐波产生的主要谐波频率中具有互补效应的主要谐波频率有2组:①正序 $f_{sub}$ 与正序 $2f_0 - f_{sub}$ ;②

表1 主要频率谐波相序与次谐波相序关系  
Table 1 Relationship of phase sequence between main frequency harmonic and sub-harmonic

主要谐波频率	谐波电流相序		
	零序次谐波	正序次谐波	负序次谐波
$f_0 - 2f_{sub}$	零序	负序	零序
$f_{sub}$	正序	正序	负序
$f_0 + 2f_{sub}$	负序	零序	负序
$2f_0 - f_{sub}$	零序	正序	零序
$2f_0 + f_{sub}$	负序	零序	正序
$3f_0 - 2f_{sub}$	负序	正序	负序
$3f_0$	零序	零序	零序
$3f_0 + 2f_{sub}$	正序	负序	正序

负序 $f_0 - 2f_{sub}$ 与正序 $3f_0 - 2f_{sub}$ 。负序次谐波产生的主要谐波频率中具有互补效应的主要谐波频率有2组:①负序 $f_{sub}$ 与正序 $2f_0 + f_{sub}$ ;②负序 $f_0 + 2f_{sub}$ 与正序 $3f_0 + 2f_{sub}$ 。交直流系统谐波振荡通常发生在交流系统较弱的情况下,而对于弱交流系统,为了确保系统电能质量的要求,通常会配置3次谐波滤波器;同时,交流系统的无功补偿容量会明显小于交流系统的短路容量,即交流系统的自然谐振频率会明显大于工频,工频和3次谐波边频带具有互补效应的2个频带一般不会发生谐波振荡,因此重点需要关注次谐波及其在2倍工频附近的超同步频率间谐波之间的谐波振荡。

### 2.3.3 计及变压器和换流器调制的谐波稳定性分析

结合2.3.2节的分析,可认为 $-20 \sim 20$  Hz频率范围内的次谐波及其互补频率的超同步频率谐波,即频率范围为 $80 \sim 120$  Hz的正序谐波产生谐波振荡的风险较高。根据式(12),次谐波励磁电流的相位与其100 Hz附近的互补频率的励磁电流相位之和为 $0^\circ$ 。

在直流系统运行的情况下,采用小信号分析法在向交流母线注入某频率下的次谐波电流 $I_s$ ,并测得该频率下交流母线的对地电压为 $U_{ss}$ ,该电压与次谐波电流的比值记为 $Z_{ss}$ ;向交流母线注入互补频率下的谐波电流 $I_m$ ,测得该母线在次谐波下的对地电压为 $U_{ms}$ ,该电压与互补频率谐波电流的关系为 $Z_{ms}$ 。可得如下关系式:

$$U_{sub} = U_{ss} + U_{ms} = Z_{ss} I_s + Z_{ms} I_m \quad (15)$$

式(15)中, $Z_{ss}$ 与 $Z_{ms}$ 可以根据小信号分析法得到。根据上述分析, $I_s$ 与 $I_m$ 的相位和为 $0^\circ$ ;  $I_m$ 的幅值略小于 $I_s$ ,为便于分析,取 $I_m$ 与 $I_s$ 的幅值相等。设交直流并联阻抗 $Z_p'$ 为 $U_{sub}$ 和 $I_s$ 的比值,则:

$$Z_p' = \frac{U_{sub}}{I_s} = \frac{Z_{ss} \angle A \times I_s \angle \varphi_{sub} + Z_{ms} \angle B \times I_s \angle -\varphi_{sub}}{I_s \angle \varphi_{sub}} =$$

$$Z_{ss} \angle A + Z_{ms} \angle (B - 2\varphi_{sub}) \quad (16)$$

其中, $A$ 、 $B$ 分别为 $Z_{ss}$ 和 $Z_{ms}$ 的阻抗角。根据计算所得的 $Z_p'$ 并使用式(9)进一步计算,可得考虑变压器

铁芯饱和和特性影响的等值直流系统阻抗,进而可以开展谐波稳定性分析。

图7给出了在考虑变压器饱和和特性情况下含串补和不含串补交流系统的谐波稳定性结果。对于含串补交流系统,其交流系统阻抗大于直流等效阻抗的频率区间明显增加。含串补交流系统的稳定裕度明显小于不含串补交流系统的稳定裕度,同时在交流系统阻抗大于等效直流系统阻抗的区间,含串补交流系统的交直流阻抗比函数出现穿越 $-180^\circ$ 的点,即存在临界不稳定点。这说明当外部扰动足以引起变压器饱和,即可发生谐波振荡现象。

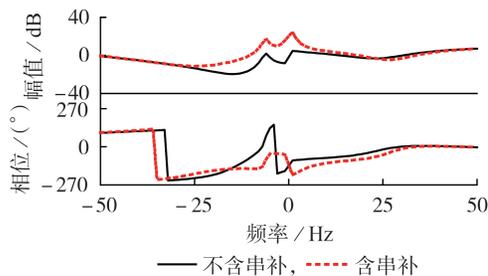


图7 计及换流变压器饱和和特性的谐波稳定性分析图  
Fig.7 Harmonic stability analysis diagram considering saturation characteristics of converter transformer

### 3 谐波振荡影响因素及仿真分析

为了验证第2节的分析,以2.2.1节中的模型为基准,设计工况以分析交流滤波器投切、交流系统阻尼特性、直流运行功率水平及外部扰动等对直流接入含串补交流系统的稳定性影响。

#### 3.1 仿真工况设计

本文中仿真工况设计如表2所示。工况1、2对比分析了含串补与不含串补交流系统的谐波稳定性;工况3验证了使能换流变压器铁芯的饱和特性的影响;工况4、5分析了谐波振荡特性对交流系统参数的敏感性;工况6对比分析了扰动大小对稳定性的影响;工况7分析了直流系统运行状态的影响。

表2 仿真工况

Table 2 Simulation operation conditions

工况	$R_1 / \Omega$	$L_1 / H$	$C_1 / \mu F$	ACF投入情况	饱和和特性情况
1	3.737	0.151	—	全投入	使能
2	3.737	0.167	608	全投入	使能
3	3.737	0.167	608	全投入	不使能
4	3.737	0.167	608	退出C型ACF	使能
5	0.737	0.167	608	退出C型ACF	使能
6	3.737	0.167	608	退出C型ACF	使能
7	0.737	0.167	608	退出C型ACF	使能

仿真中在直流母线上设置短时高阻接地故障模拟交流系统扰动,除工况6下接地故障电阻设为 $200 \Omega$ 以外,其余工况下均设为 $500 \Omega$ 。各工况的直流功率水平除工况7下设为 $0.5 \text{ p.u.}$ 以外,其余工况

均设为 $1 \text{ p.u.}$ 。变压器基本参数采用Benchmark模型的默认参数,饱和参数见附录中表A1。

#### 3.2 仿真结果及分析

附录中图A6给出了工况1—7在扰动后的仿真波形。除工况3不使能换流变压器铁芯的饱和和特性外,其余工况均在 $2 \text{ s}$ 时使能换流变压器铁芯的饱和和特性,在 $2.1 \text{ s}$ 时在换流站母线上模拟A相高阻接地故障,故障持续时间为 $0.05 \text{ s}$ ,稳定性计算结果如表3所示。

表3 各工况仿真稳定性结果

Table 3 Stability results for each case

工况	是否稳定	工况	是否稳定
1	是	5	否
2	否	6	否
3	是	7	否
4	是		

结合仿真结果和理论分析,高压直流和含串补交流系统发生次/超同步铁磁谐振需要3个必要条件:①高压直流输电系统经过仅含串补的线路接入交流系统,且串补在投入运行状态;②有足够大的外部扰动使得变压器铁芯进入饱和状态;③2个互补频率的谐波经换流器调制后可以向对方提供足够大的能量,交流系统阻尼的大小、与次谐波存在镜像频率效应的谐波阻抗大小、直流系统的运行功率水平(影响换相角进而影响等值直流阻抗)等均会对高压直流和含串补交流系统发生次/超同步铁磁谐振产生影响。

### 4 永富工程解决措施分析

结合3.2节分析的发生次/超同步铁磁谐振的3个必要条件,由于故障扰动的大小不受控制,应当考虑从旁路串补和改变直流系统的运行点着手解决问题。

#### 4.1 旁路串补

旁路串补工程实现上相对比较简单。旁路多个串补中的一个可以为暂态恢复过程中串补上的能量提供释放通路,降低变压器饱和的可能性,另外一方面旁路多个串补中的一个可以使得交流系统在频率很低时的阻抗大幅减小,减弱其与互补频率之间的耦合。为了对比说明,使用永富直流工程的实际参数在PSCAD中搭建模型对现场工况(额定电压为 $\pm 500 \text{ kV}$ ,额定功率为 $1400 \text{ MW}$ )进行仿真分析,附录中图A7和图A8分别为富宁到武平2回线路串补都投入和仅投入1回线路串补时的直流电流波形,从波形可以看出,旁路1组线路串补可以有效避免此类振荡问题。

#### 4.2 调整直流系统运行状态

旁路串补虽然在实现上比较简单,但在交流系

统较弱的情况下,旁路串补就意味着大幅降低系统的短路容量,对于弱交流系统特别是接入逆变站的弱交流系统,将恶化直流的运行条件,对直流的输送容量造成影响。因此有必要从改变系统阻抗特性、降低非线性调制转移的能量的角度考虑解决这一特征谐振的方法。

在交流系统条件不变且不新增设备的前提下,换流站内可调节的仅有直流功率水平和滤波器投切这2种,通常滤波器的投切与直流输送功率和运行方式相匹配。图8为在2回线路串补均投入的情况下,不同滤波器投入情况下交流系统的阻抗特性,滤波器投入数量的变化基本不影响20 Hz以下的阻抗特性;但对100 Hz左右的阻抗影响明显,随着滤波器数量的增加其幅值呈现从先增大后减小的趋势。因此通过串补投退和直流运行功率水平(即滤波器投切策略的配合),可以在尽量保证输送功率要求的前提下,进一步降低发生振荡的风险。

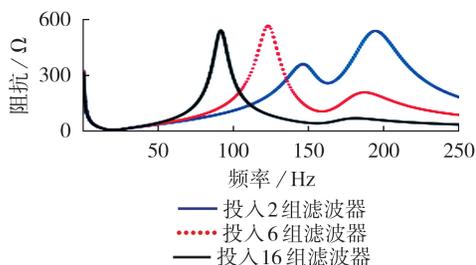


图8 不同滤波器投入情况下的交流系统阻抗特性

Fig.8 Impedance-frequency characteristics of AC system with different filters in operation

附录中图A9和图A10分别为2回线路串补均投入的情况下,直流功率500 MW和3000 MW时使用永富直流工程模型的仿真结果。仿真结果与理论分析吻合,所提出的抑制措施在永富直流工程中成功应用。

## 5 结论

高压直流输电工程经含串补线路接入交流系统时,高压直流换流器的调制作用使得交流侧互补频率(即频率之和为2倍工频)谐波之间存在耦合关系,由于串补在低频下的高容抗特性使得频率较低的次同步频率谐波与100 Hz附近的超同步频率谐波之间的耦合作用增强,大幅降低了系统的稳定裕度。同时,变压器铁芯饱和特性的非线性影响,导致变压器励磁电流的频谱发生迁移,会产生与次谐波互为镜像频率的超同步励磁电流分量。当系统发生的扰动导致变压器铁芯饱和时,将会激发次/超同步的铁磁谐振现象。因此,串补、铁芯饱和以及足够大的外部扰动是交直流系统间发生此类谐波振荡现象的必要条件。结合机理分析和仿真验证,在

明确振荡主导因素的基础上,提出了避免功率振荡的工程化解决措施,即根据系统功率水平合理选择串补接入运行方式,该措施在实际工程中的应用证明了其有效性。

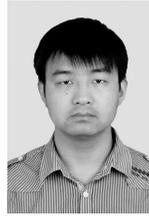
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 陈钦磊,郭春林,于鹏,等. 光伏、火电打捆经串补送出系统的次同步振荡研究[J]. 现代电力,2016,33(5):59-67.  
CHEN Qinlei, GUO Chunlin, YU Peng, et al. Research on sub-synchronous oscillations in power system with photovoltaic-thermal-bundled power transmitted by series compensation [J]. Modern Electric Power, 2016, 33(5): 59-67.
- [2] 高本锋,姚磊. 模糊自抗扰附加阻尼控制抑制光火打捆经串补送出的次同步振荡[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):121-127.  
GAO Benfeng, YAO Lei. Supplementary damping control of SSO based on fuzzy active disturbance rejection control for photovoltaic-thermal-bundled system transmitted by series compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 121-127.
- [3] 张东辉,洪潮,周保荣,等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统方案研究[J]. 南方电网技术,2014,8(6):1-6.  
ZHANG Donghui, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Asynchronous interconnection system scheme for Yunnan Power Grid and the main grid of China Southern Power Grid [J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 1-6.
- [4] 潘晓杰,张顺,文汀,等. 渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(19):157-162.  
PAN Xiaojie, ZHANG Shun, WEN Ting, et al. Operation characteristic analysis of central China power grid in unsynchronized interconnection of Chongqing and Hubei Power Grid [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 157-162.
- [5] 王晓宇,杨杰,吴亚楠,等. 渝鄂背靠背柔性直流对系统次同步振荡特性的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):188-194,202.  
WANG Xiaoyu, YANG Jie, WU Yanan, et al. Effect analysis of back-to-back flexible HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid on sub-synchronous oscillation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 188-194, 202.
- [6] 董晨,张海波,李亚男,等. 高岭背靠背直流工程安全稳定控制策略[J]. 电网技术,2015,39(5):1240-1245.  
DONG Chen, ZHANG Haibo, LI Yanan, et al. Security and stability control strategy of Gaoling back-to-back HVDC project [J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1240-1245.
- [7] AINSWORTH J D. Harmonic instability between controlled static converters and a.c. networks [J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1967, 114(7): 949-957.
- [8] YACAMINI R, DE OLIVEIRA J C. Instability in h. v. d. c. schemes at low-order integer harmonics [J]. IEE Proceedings C: Generation, Transmission and Distribution, 1980, 127(3): 179-188.
- [9] 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.
- [10] 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 Lijuan, MU Zilong, JIN Xiaoming, et al. Criterion of har-

- monic instability at sending end of HVDC power transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4):62-68.
- [11] 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和不稳定的抑制[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 32-36.  
YANG Xiaobing, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Suppression of core saturation instability in converter transformer for UHVDC power transmission system from Yunnan to Guangdong[J]. Power System Technology, 2009, 33(19):32-36.
- [12] 谢志成, 钱海, 林湘宁, 等. 直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2):216-223.  
XIE Zhicheng, QIAN Hai, LIN Xiangning, et al. Quantitative state assessment method for transformer under DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):216-223.
- [13] 魏玥, 刘天琪, 晏小彬, 等. 高压直流输电系统直流偏磁下的谐波不稳定判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 139-144.  
WEI Yue, LIU Tianqi, YAN Xiaobin, et al. Study of harmonic instability criterion under DC magnetic bias in HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 139-144.
- [14] RYGG A, MOLINAS M, ZHANG C, et al. A modified sequence-domain impedance definition and its equivalence to the  $dq$ -domain impedance definition for the stability analysis of AC power electronic systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4):1383-1396.
- [15] 黄莹, 黎小林, 饶宏, 等. 云广±800 kV 直流输电工程交流滤波器设计关键问题研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2):67-71.  
HUANG Ying, LI Xiaolin, RAO Hong, et al. Study on the key issues of AC filter design for Yunnan-Guangdong ±800 kV DC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2):67-71.
- [16] 张万荣, 任军辉, 王蔚华. ±800 kV 特高压直流输电工程直流滤波器设计研究[J]. 高压电器, 2007, 43(6):431-433, 443.  
ZHANG Wanrong, REN Junhui, WANG Weihua. Design and study on filter in ±800 kV ultra high voltage direct current transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 431-433, 443.

#### 作者简介:



赵晓斌

赵晓斌(1985—),男,河南三门峡人,正高级工程师,硕士,主要从事高压直流输电工程过电压与绝缘配合、交直流谐波谐振相关方向的研究工作(E-mail: zhaoxb@csg.cn);

谢小荣(1975—),男,湖南邵阳人,教授,博士,研究方向为电力电子系统次同步振荡、次超同步振荡分析与控制(E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn);

李岩(1973—),男,河北石家庄人,教授级高级工程师,博士,主要从事高压直流输电成套设计和控制保护相关方向的研究工作(E-mail: liyan@csg.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Mechanism and counter-measure of sub-/super-synchronous ferromagnetic resonance between HVDC and AC system with series compensation

ZHAO Xiaobin<sup>1,2</sup>, XIE Xiaorong<sup>2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, ZOU Changyue<sup>1</sup>, XIN Qingming<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The sub-/super-synchronous ferromagnetic resonance that occurred during the recovery process after a commutation failure at Funing Station on May 29, 2017 is analyzed. The reason of sub-/super-synchronous ferromagnetic resonance between HVDC and AC system with SC (Series Compensation) is verified by theoretical analysis and simulation. The impedance magnitude is greatly increased in the AC system with SC at sub-synchronous frequency harmonics, so that the coupling between the sub-synchronous frequency harmonics and its complementary frequency harmonics is enhanced. The Nyquist stability criterion is used to analyze the impedance of the AC and DC system. Considering SC, the stability of the AC and DC system decreases but the system is still stable. The existence of sub-synchronous frequency harmonics easily makes the transformer saturated, lead to decrease the system stability. Theoretical analysis and simulative results show that, under the action of two non-linear factors of converter modulation and transformer core saturation, sub-/super-synchronous ferromagnetic resonance occurs in AC and DC system after large disturbance. The combination of SC and AC filters can effectively suppress this type of resonance.

**Key words:** HVDC power transmission; series compensation; sub-/super-synchronous frequency harmonics; ferromagnetic resonance; transformer saturation

附录

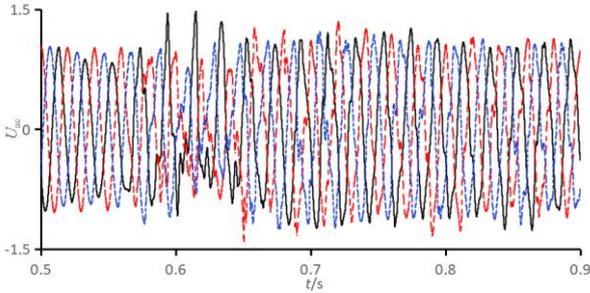


图 A1 现场交流电压波形  
Fig.A1 AC voltage waveform in field

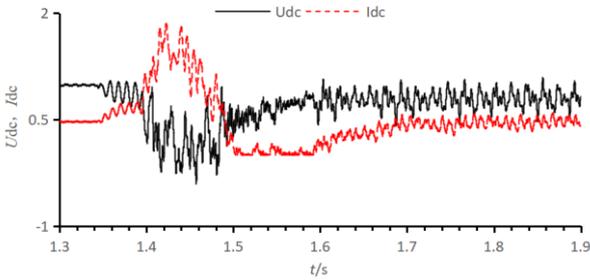


图 A2 现场直流电压、电流波形  
Fig.A2 DC voltage & current waveform in field

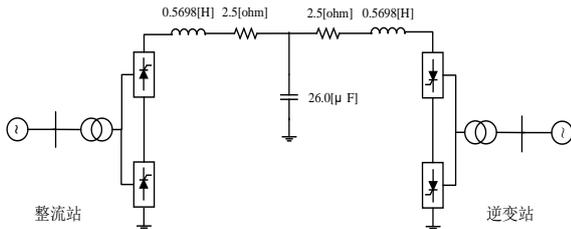


图 A3 Benchmark 模型  
Fig.A3 Benchmark model

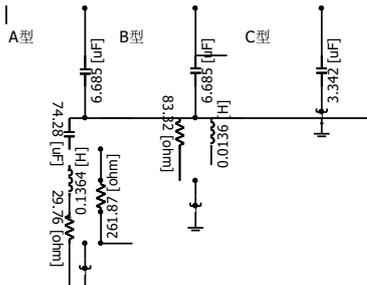


图 A4 整流站交流滤波器配置  
Fig.A4 AC filters of Rectifier station

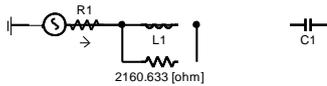
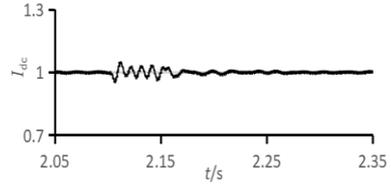
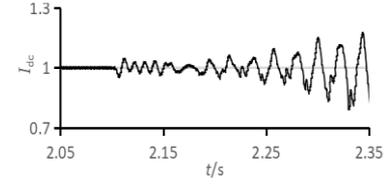


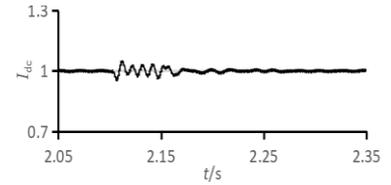
图 A5 整流站电源结构示意图  
Fig.A5 Source structure of Rectifier station



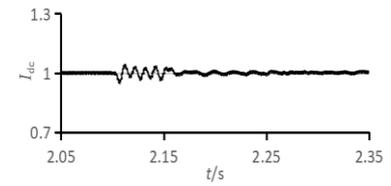
(a)工况 1



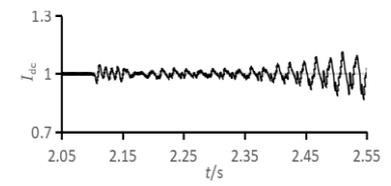
(b)工况 2



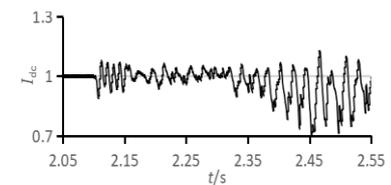
(c)工况 3



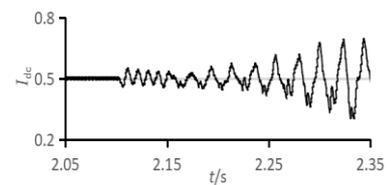
(d)工况 4



(e)工况 5



(f)工况 6



(g)工况 7

图 A6 工况 1 至 7 直流电流波形图  
Fig.A6 DC current waveform of case 1 to 7

表 A1 变压器饱和特性参数表

Table A1 Parameters of the transformer saturation

参数	数值
气隙电抗	0.2 p.u.
涌流衰减时间常数	2 s
拐点电压	1.1 p.u.
励磁电流	0.1%

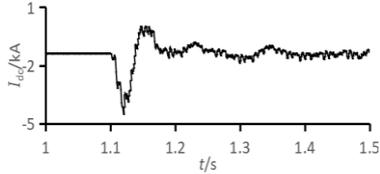


图 A7 两回线路串补均投入、1 400 MW 直流电流仿真波形

Fig.A7 1 400 MW DC current simulation waveform with both of series compensations in operation

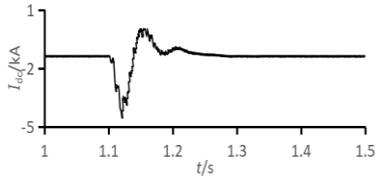


图 A8 旁路一回串补、1 400 MW 直流电流仿真波形

Fig.A8 1 400 MW DC current simulation waveform with one of series compensations out of service

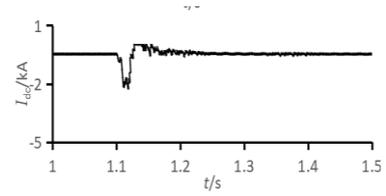


图 A9 串补均投入、500 MW 直流电流仿真波形

Fig.A9 500 MW DC current simulation waveform with both of s series compensations in operation

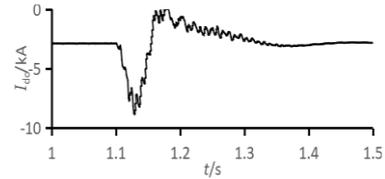


图 A10 串补均投入、3 000 MW 直流电流仿真波形

Fig.A10 3 000 MW DC current simulation waveform with both of series compensations in operation