

基于傅里叶分析的高压直流输电次同步振荡控制研究

刘影, 景致远, 陈贵刚, 马豪杰

(电子科技大学机械与电气工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:当高压直流输电遭受短时扰动时, 电气量变化产生的电磁转矩变化量所包含的电气负阻尼转矩, 加剧了汽轮发电机的转速变化, 使得输电线路中产生次同步振荡现象。文中通过傅里叶分析方法计算出电网次同步振荡频率, 在汽轮发电机的转子转速控制系统中通过调节励磁系统锁相环的频率合成, 减小励磁电流波动, 生成一个新的附加电磁转矩量, 使最终的电气阻尼转矩分量为正, 实现对转子转矩控制。仿真结果表明, 在电网出现短时扰动时, 汽轮发电机的转速没有出现大波动, 实现了对次同步振荡的有效抑制。

关键词:高压直流输电; 汽轮发电机; 傅里叶分析; 次同步振荡

中图分类号: TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0025-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230405

Research on Control of Sub-synchronous Oscillation in HVDC Transmission Based on Fourier Analysis

LIU Ying, JING Zhiyuan, CHEN Guigang, MA Haojie

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: When high voltage direct current (HVDC) transmission is subject to short-term disturbance, the variation of electromagnetic torque caused by the change of electric parameters includes the component of electric negative damping torque, which intensifies the variation of turbo-generator speed and causes sub-synchronous oscillation in transmission lines. The frequency of sub-synchronous oscillation is calculated by Fourier analysis method. In the rotor speed control system of turbine generator, the fluctuation of excitation current is reduced by adjusting the frequency synthesis of phase locked loop in excitation system, and a new additional electromagnetic torque is generated, so that the final electrical damping torque component is positive, and the rotor torque is controlled. The simulation results show that the speed of turbine generator does not fluctuate greatly when power grid is disturbed in a short time, and the sub-synchronous oscillation is effectively suppressed.

Key words: HVDC transmission; turbine generator; Fourier analysis; sub-synchronous oscillation

0 引言

高压直流输电与传统交流输电方式相比, 能够输送大容量的电能且输送距离不受限制, 在发生故障时具有快速发现并将其恢复以及可以多次进行降压启动和再启动的优点^[1-2]。除此以外, 高压直流输电系统所使用的架空线路成本低、

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0900)

传输电能效率也较高。但是高压直流输电的次同步振荡现象^[3-4]严重影响电力系统的安全运行, 大幅降低系统的稳定性。高压直流输电系统的次同步振荡现象是在机械子装置与电气子装置的相互作用下引起的。次同步振荡对汽轮发电机转子影响很大, 如果不加以抑制措施, 会对转子造成损坏, 严重时甚至使转子断裂^[5]。

目前对高压直流输电系统次同步振荡的分析主要采用前期的检测分析和检测后的精确分析方法。

文献[6]提出了等效电阻电抗值分析法;文献[7]提出了发电机相互作用分析法。这两种方法主要是用来判断电力系统中哪些汽轮发电机发生了次同步振荡现象。文献[8-9]的方法需要有汽轮发电机组轴系运行时的参数,并通过对轴系运行方式调整实现对次同步振荡的控制,该方法响应速度快,但只能对整个电力系统的次同步运行情况做出比较粗略的评估,而且分析结果与运行结果偏差较大。文献[10]提出了复合力矩分析法。文献[11]提出了本征值分析法。这一类方法要求有汽轮发电机组轴系运行时的详细参数而且还要有比较详细的数学模型,运算方式比较复杂,运算速度很慢。

傅里叶分析可以通过提取的各个交流侧信号、直流侧信号以及转速信号,得到各信号的频域特性,通过对比各信号的频域特性,可较快得知轴系次同步振荡的频率。因此,下面在傅里叶分析的基础上,从高压直流输电系统变流装置电气特性出发,计算系统的次同步振荡频率,通过调节汽轮发电机的励磁系统输出,实现次同步振荡控制。

1 次同步振荡产生机理

高压直流输电系统中汽轮发电机产生的电能是通过变流器转换以直流的形式传输。图1为搭建的换流站电路结构模型。当高压直流输电系统的换流站与汽轮发电机在距离上十分接近时,在发电机的转子上施加一个干扰量 $\Delta\omega$,在各设备上的电气量变化过程如图2所示。

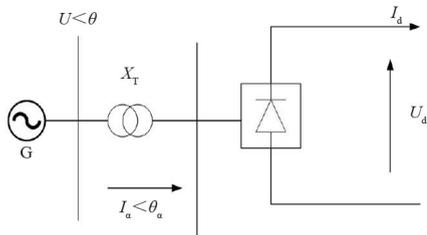


图1 换流站的电路结构模型

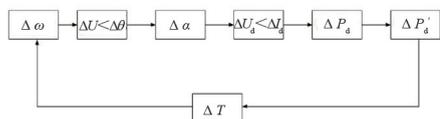


图2 各设备的电气量变化过程

如图2所示,发电机转子转速的变化会使交流输电线路电压的大小 U 和相角 θ 发生改变,从而使施加的干扰量随着交流输电线路传递到换流站线路

上。换流站中三相桥式全控整流电路的触发延迟角发生 $\Delta\alpha$ 变化,引起直流输电线路电压 U_d 和电流 I_d 的变化,使直流输电有功功率发生变化,变化值为 ΔP_d 。电网的功率波动又会影响发电机的转子转矩,产生转矩波动 ΔT 。发电机的转子速度发生变化,最终形成越来越强的轴系振动危害转子本体安全^[12]。转速偏差 $\Delta\omega$ 与电磁转矩 ΔT_e 的相位如图3所示,横坐标 $\Delta\delta$ 为功角偏差。

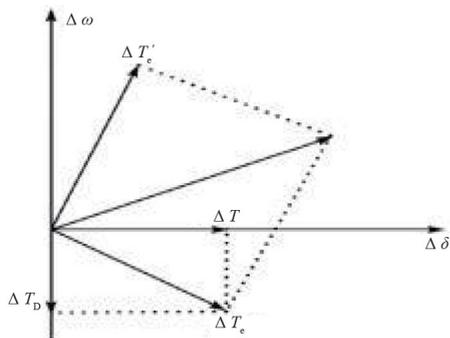


图3 电磁转矩与转速偏差相位

图3中,当 ΔT_e 相位滞后于 $\Delta\omega$ 相位 90° 至 270° 之间时,电气阻尼转矩 ΔT_b 为负,可能导致系统不稳定。如果能够有一个附加电磁转矩,使得新的电磁转矩位于第一象限 $\Delta T_e'$,就会使得电气阻尼转矩为正,从而达到抑制次同步振荡的目的。

2 基于傅里叶分析的次同步振荡抑制

把变流装置的三相电压以傅里叶级数和的形式表示如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_a = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos m\omega_0 t \\ u_b = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos m(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos m(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_0 为输电线路工作频率。

在变流装置的整流过程中,三相电压在式(1)中的系数 B_m 为

$$B_m = \sin \frac{m\pi}{2} \cdot \cos \frac{m\pi}{6} \cdot \cos \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{m} \quad (2)$$

当变流装置两端的交流输电线路和直流输电线路存在次同步振荡时,此时交流输电线路每一相的电压 u_a 、 u_b 、 u_c 都是不对称的,它们的数学表达式为

$$\begin{cases} u_a = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos \omega_n t \\ u_b = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos(\omega_n t - \frac{2s\pi}{3}) \\ u_c = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos(\omega_n t + \frac{2s\pi}{3}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S=-1,0,1$,分别表示负序、零序、正序; ω_n 为次同步振荡频率。

由上述式(1)一式(3)可以得到三相不对称的交流电压在经过变流装置后,它的电压 u_d 为

$$u_d = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{B_m}{2} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[1 + 2\cos \frac{2(m+s)\pi}{3} \right] \cdot \cos[(\omega_0 + m\omega_n)t] + \\ & \left[1 + 2\cos \frac{2(m-s)\pi}{3} \right] \cdot \cos[(\omega_0 - m\omega_n)t] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

仅考虑负序电压和正序电压时,在交流输电线路流过次同步振荡频率 ω_n ,会在直流输电线路感应出频率为 $\omega_0 + m\omega_n$ 和 $\omega_0 - m\omega_n$ 的电压分量,其中:频率分量 $\omega_0 + m\omega_n$ 超过同步频率的分量,这种频率分量会逐渐被抑制;而 $\omega_0 - m\omega_n$ 频率分量会经过交流输电线路传输到直流输电线路,汽轮发电机组的转子将会出现频率为 $\omega_0 - m\omega_n$ 的频率分量,影响发电机的正常工作。通过傅里叶分析,可计算出发电机转子的振荡频率,该频率就是要抑制的频率。

针对要抑制的次同步振荡频率,设置相应的滤波装置参数,并使用汽轮发电机的励磁激励方法,设置励磁机的移相器参数。以发电机转速偏差信号作为输入信号,经滤波装置和移相器调整后,将其作为励磁电压调节器的附加控制信号,进而产生一个附加电磁转矩,使得调节后的电磁转矩变化量与转速偏差的相位差小于 90° ,最终使系统具有正的阻尼转矩,从而达到抑制次同步振荡的效果。

移相器主要包括同步单元、移相单元、脉冲形成及放大单元。移相触发是根据输入控制信号的大小,改变输送到晶闸管的脉冲触发角,以控制晶闸管整流电路的输出,从而调节发电机的励磁电流。其中同步单元,要求加在整流电路晶闸管的触发脉冲与加在晶闸管阳极电路上的电压在频率和相位上步调一致。即触发脉冲在晶闸管承受正向电压时发

出,才能使晶闸管导通。触发脉冲受次同步振荡的影响,会造成励磁电流波动。

励磁机的移相器采用锁相环结构实现对调节频率的同步跟踪,该结构由相位比较器、低通滤波器和压控振荡器组成,如图4所示。

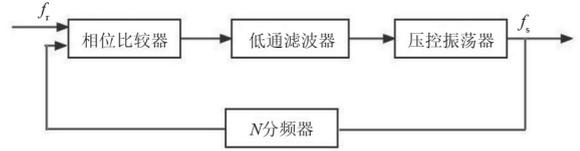


图4 锁相环的频率合成原理

首先,将频率为 $\omega_0 - m\omega_n$ 的频率分量经低通滤波去除由于一个周期信号中含有高次谐波而可能产生的多余过零点。再经过零检测电路将信号变成方波信号 f_r ,这个方波信号频率和系统电压频率相同。然后将这个方波信号送到图4的相位比较器的一个输入端作为比较基准。另外,由压控振荡器产生频率为 f_s 的方波信号,经一个分频器 N 分频后送到相位比较器的另一端与 f_r 相比较。如果被测信号的频率 f_r 发生变化,则 N 分频器的输出频率 f_s 也随之变化。这样就通过锁相环实现对调节频率的同步跟踪,达到了压控振荡器产生抑制次同步振荡频率的目的。

3 仿真分析及结果

首先对IEEE次同步振荡第一标准模型^[13]进行仿真,模型中将汽轮发电机中汽轮机和发电机分别等效为硬连接的LPA质量块和LPB质量块。该系统的额定功率为60 Hz,待研机组侧端电压为26 kV,额定容量为892.4 MVA。对得到的相电压瞬时值波形进行傅里叶分析,如图5所示,可以看到电网系统谐振频率约为39.67 Hz。

对次同步振荡标准第一模型得到的LPA质量块和LPB质量块之间转矩的波形进行快速傅里叶变换分析,如图6所示。从图6可见转子的振荡频率约为20.34 Hz,此频率与该模型其中一个扭振模态的频率20.21 Hz较为接近,可以发现,转子的振荡频率与发电机输出电压的振荡频率之和约为该模型的工频值(60 Hz)。

使用PSCAD/EMTDC软件结合上述IEEE次同步振荡第一标准模型对高压直流系统次同步振荡现

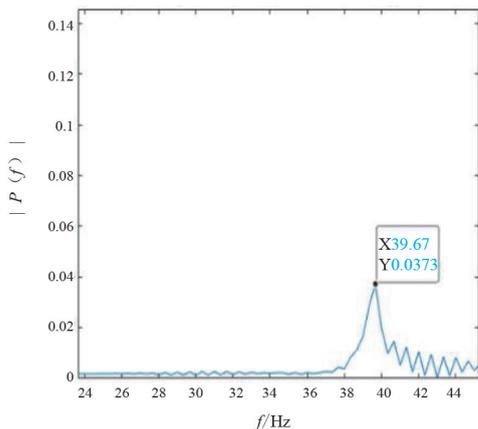


图 5 相电压频域

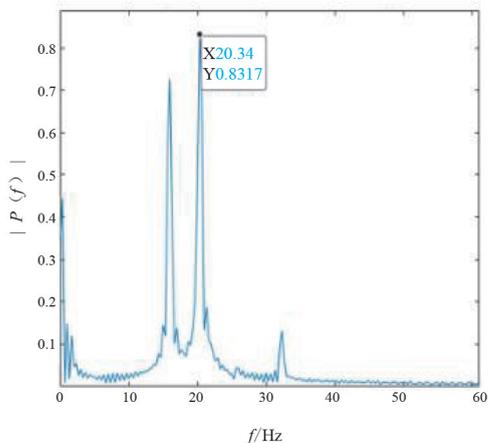


图 6 LPA 与 LPB 之间转矩频域

象进行仿真。以软件范例中自带的高压直流输电模型为基础,在高压直流输电系统的交流输电线路中加入同步发电机模型。高压直流输电系统次同步振荡整体模型如图 7 所示。

图 7 中发送端系统的额定电压为 345 kV,线路电阻为 2160 Ω,线路电感为 0.151 0 H;接收端系统的额定电压为 230 kV,线路电阻为 24.81 Ω,线路电感为 0.036 5 H,频率都是 60 Hz。整流侧同步发电机模型如图 8 所示。

图 8 中,同步发电机的输出电压为 382 kV,额定容量为 892.4 MVA。发电机轴系模型的参数与 IEEE 次同步振荡第一标准模型的参数一致,故该系统的扭振模态与第一标准模型扭振模态一致。引发次同步振荡现象是通过在高压直流输电系统整流侧的母线上施加三相短路故障实现。总仿真时长为 6 s,在 1.5 s 时发生短路,短路持续时间为 0.075 s。图 9 为高压直流输电系统的交流侧电压与直流侧电压。图 10 为汽轮发电机的转矩变换。

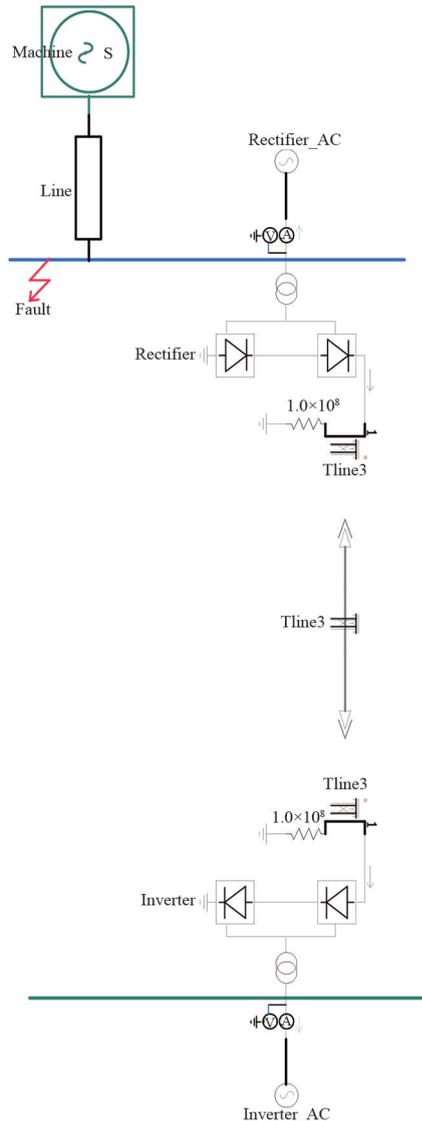


图 7 高压直流输电系统的次同步振荡模型

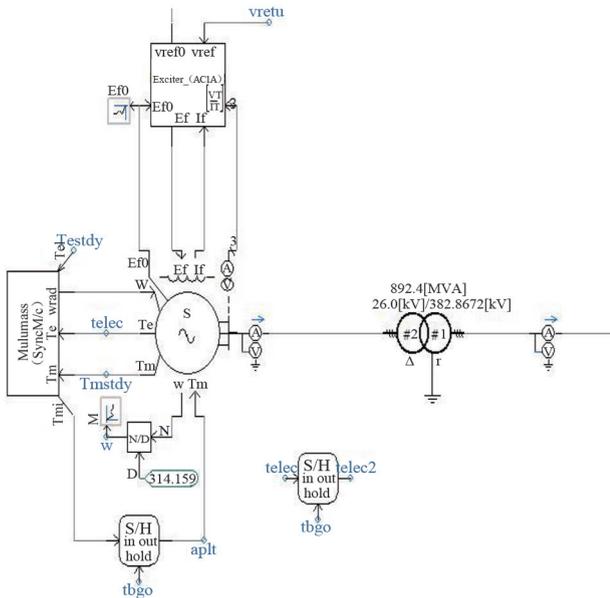
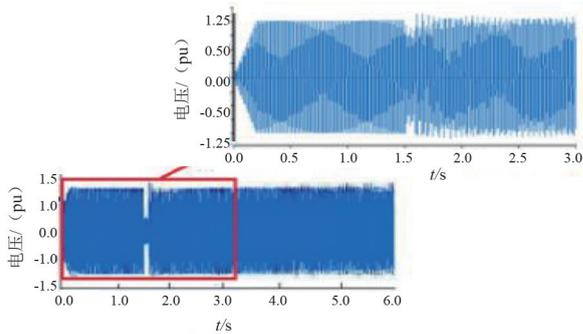
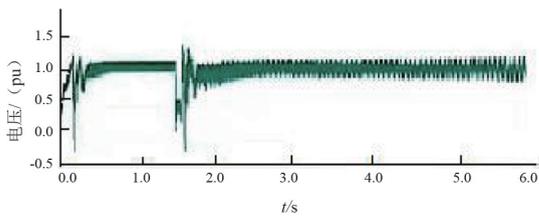


图 8 同步发电机模型



(a) 交流测电压



(b) 直流测电压

图 9 交流侧电压与直流侧电压

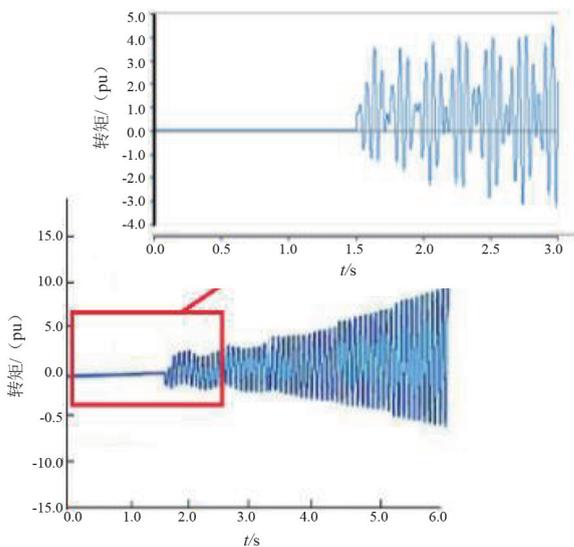


图 10 汽轮发电机的转矩变化

从图 10 可以看出,在 1.5 s 引发的三相短路使高压直流输电系统发生了次同步振荡,汽轮发电机的转矩在 1.5 s 之后就变得不稳定起来且呈扩散的趋势。如果不加入一些抑制措施,可以预想到汽轮发电机的轴系必将损坏。

利用复转矩系数法与时域仿真法相结合,对上述建立的模型进行电气阻尼分析:首先,向待研究电机转子施加一个频率为 ω_n 的小幅脉动转矩扰动,待系统稳定后,分别截取一个周期内的角速度增量和电磁转矩增量;然后,分别对这两个量进行快速傅里

叶变换分析,由此分别获得这两个量的幅频特性曲线图和相频特性曲线图;最后,由式(5)可得到相应扰动频率下的电气阻尼系数。

$$K_D(\omega_n) = \text{Re}(\Delta T_e / \Delta \omega) \quad (5)$$

式中, $K_D(\omega_n)$ 为不同频率下的阻尼系数。

经计算,扰动频率为 20.21 Hz (扭振频率) 的电气阻尼系数为 -23.833,扰动频率为 24.00 Hz 的电气阻尼系数为 4.86。这证明了在扭振频率扰动信号下电气阻尼系数为负,后续加入抑制措施后,电气阻尼系数可作为评判次同步振荡是否被抑制的标准。

图 11 和图 12 分别显示了电磁转矩和转速偏差在扭振频率处的相位点,电磁转矩相位滞后转速偏差相位 133° 。

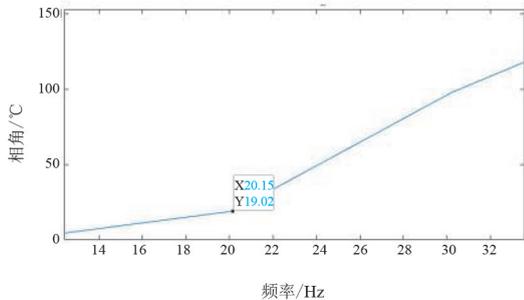


图 11 20.21 Hz 下的转速偏差相频特性

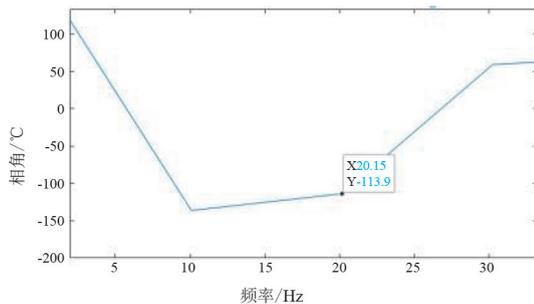


图 12 20.21 Hz 下的电磁转矩相频特性

当发生次同步振荡时,汽轮发电机的转速连续变化,所以相应的频率也在一定范围内变化。次同步振荡的频率一般为 5~60 Hz,所以在搭建次同步振荡抑制模型时,通过傅里叶分析得出了所搭建模型在三相短路故障下所引发的次同步振荡频率值也在这个范围。因此,在仿真中首先将搭架模型所产生的次同步振荡信号通过一阶低通滤波器和一阶高通滤波器,提取该频率段的信号。再将提取出的频率 5~60 Hz 的信号经过中心频率为次同步振荡频率值的带通滤波器,送入励磁系统的锁相环频率合

成电路,调节励磁系统的输出电流,使汽轮发电机的转子转速稳定,加入次同步振荡抑制结构后的汽轮发电机的转子转矩变化如图 13 所示。

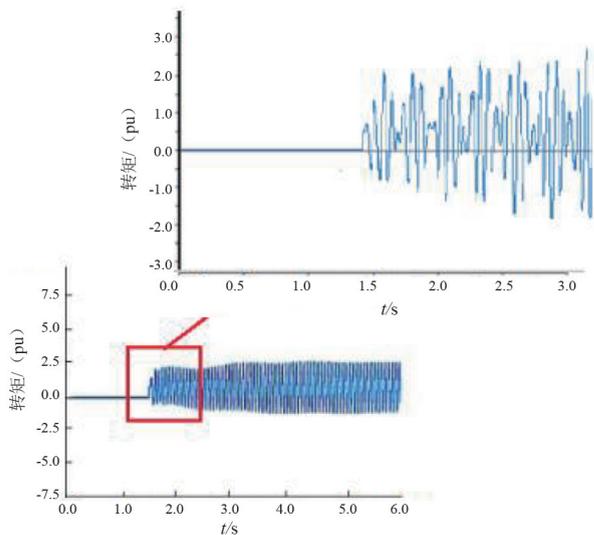


图 13 加入次同步振荡抑制的转子转矩

从图 13 中可以看出,加入次同步振荡抑制后,汽轮发电机的转子转矩相比于未加入次同步振荡抑制时明显减小,转速没有出现太大波动,也没有呈现出扩散的趋势,说明所提方法可以抑制高压直流输电系统次同步振荡。

4 结 论

当高压直流输电系统的电气设备发生故障或者输电线路遭受扰动时,汽轮发电机转子因为外界的干扰在发电机的内部装置中会出现次同步振荡,对高压直流输电系统以及汽轮发电机的转子本体造成威胁。上面采用傅里叶分析方法计算得出输电系统发生扰动时的次同步振荡频率,在汽轮发电机的转子转速控制系统中通过调节励磁系统中锁相环的频率合成,减小励磁电流的波动,同时生成一个新的附加电磁转矩量,使得最终的电气阻尼转矩分量为正,实现对转子转矩控制。对电力电子器件的控制除了考虑励磁系统,还可以考虑换流站中的电力电子器件,这也是后续需要研究的方向。

参考文献

[1] 陈龙龙,魏晓光,等.大容量可控关断的直流输电用电

- 流源型换流器研究综述[J].中国电力 2021,54(1):25-36.
- [2] MOHAMMADI Fazel, ROUZBEHI Kumars, HAJIAN Masood, et al. HVDC circuit breakers: a comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(12):13726-13739.
- [3] 王敏华,康积涛,裴超志.高压直流输电次同步振荡时域仿真分析与控制[J].四川电力技术,2014,(4):18-22.
- [4] DAMAS Robin Noel, SON Yongju, YOON Myungseok, et al. Subsynchronous oscillation and advanced analysis: a review[J]. IEEE Access, 2020,8:2169-353.
- [5] 党存禄,严占想,陈蕾.高压直流输电次同步振荡轴系扭振分析[J].自动化仪表,2017,38(11):22-26.
- [6] BOGLIETTI Aldo, CAVAGNINO Andrea, LAZZARI Mario. Computational algorithms for induction motor equivalent circuit parameter determination—Part I: resistances and leakage reactance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9):3723-3733.
- [7] 张剑,肖湘宁,高本锋,等.双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J].电工技术学报,2013,28(12):142-149.
- [8] 詹荣荣,赵寒,杜丁香,等.发电机轴系特性动态模拟的可行性探讨[J].电气应用,2012,31(21):70-74.
- [9] 刘代祥,汪立.发电厂次同步振荡(SSO)问题的解决方法[J].四川电力技术,2012,35(2):78-84.
- [10] 倪以信,王艳春,陈寿荪,等.多机系统 HVDC 引起的轴系扭振的扫频——复数力矩系数分析[J].电力系统及其自动化学报,1991,3(2):44-55.
- [11] 周佩朋,宋瑞华,李光,等.基于附加比例谐振控制的风机次同步振荡抑制方法[J].中国电机工程学报,2021,41(11):3797-3806.
- [12] 王彤彤,文俊,靳海强,等. HVDC 换相失败引发次同步振荡现象分析[J].电气应用,2020,39(1):30-36.
- [13] 李希哲,田霖林.基于第一标准型含直驱风电场并网引发系统次同步振荡特性的分析[J].西北水电,2018(1):81-85.

作者简介:

刘影(1984),女,博士,副教授,研究方向为智能电网、信号与信息处理;

景致远(1999),男,硕士研究生,研究方向为电子信息、智能电网、电力系统及其自动化;

陈贵刚(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期:2023-05-06)