

机端次同步阻尼控制器在大型火电厂的配置研究及应用

母雪东, 孙家兴

(苏能(锡林郭勒)发电有限公司, 内蒙古 锡林郭勒 026321)

摘要: 机端次同步阻尼控制器(GTSDC)通过在发电机定子侧输入抑制电流信号, 达到抑制火电机组轴系扭振的目的。GTSDC在不同现场的容量配置不同, 对于存在次同步振荡风险的电厂, 评估其振荡风险及GTSDC设备容量是有必要的。以山西某火电厂为研究对象, 采用复转矩系数法及时域仿真法分析了该电厂的次同步振荡风险, 并运用PSCAD仿真评估了GTSDC设备的工程配置方案, 从GTSDC设备投运后的响应来看, 振荡发生后GTSDC可瞬时发出抑制电流, 使振荡在5 s内收敛到较低水平, 从而验证了此工程方案的有效性。

关键词: 机端阻尼控制器; 火电厂; 仿真; 配置; 抑制

Research and application of terminal subsynchronous damping controller configuration in large thermal power plants

MU Xuedong, SUN Jiaying

(Su Neng (Xilin Gol) Power Generation Co., Ltd., Xilin Gol 026321, China)

Abstract: The Generator Terminal Sub-Synchronous Damping Controller (GTSDC) suppresses torsional vibrations in the shaft system of thermal power units by inputting damping current signals on the stator side of the generator. The capacity configuration of the GTSDC varies across different sites. For a power plant with the risk of sub-synchronous oscillation, it is necessary to evaluate the oscillation risk and the capacity of the GTSDC equipment. This paper studies a thermal power plant in Shanxi province, analyzing the sub-synchronous oscillation risk of the plant using the complex torque coefficient method and the time domain simulation method. The engineering configuration scheme of the GTSDC equipment was evaluated using PSCAD simulation methods. The response of the GTSDC equipment after commissioning showed that the GTSDC quickly issued a damping current after the oscillation occurred, causing the oscillation to converge to a lower level within 5 seconds. This confirms the effectiveness of the engineering scheme.

Keywords: GTSDC; power plant; simulation; configuration; suppression

0 引言

机端次同步阻尼控制器(Generator Terminal Sub-synchronous Damp Controller, GTSDC)用于抑制火电机组轴系扭振, 该设备通过在发

电机定子侧施加控制信号增加机组的次同步电气阻尼^[1-3], 实现抑制发电机轴系扭振的目的。

不同现场GTSDC容量不同, 容量大小需要通过火电机组的次同步振荡进行风险评估计算

后确定, GTSDC容量的评估需要综合考虑火电厂轴系模态疲劳累计、所在网架结构中的元件、运行方式、工程实施等各方面的情况。

本文以山西某电厂C为例, 分析其次同步振荡风险及GTSDC配置方案。电厂C机组由上海汽轮机厂生产的汽轮机及上海电机厂生产的发电机构成, 机组容量为 2×500 MW。电厂C所在的网架结构如图1所示。其中, 电厂C近区包括 2×600 MW电厂A及 2×660 MW电厂B。电厂A、B机组与电厂C机组为不同生产厂家, 不属于同型机组。电厂C通过双回500 kV串补线路连接至保北站, 再通过双回500 kV线路连接至电厂A母线; 电厂A通过单回500 kV线路连接至电厂B母线。

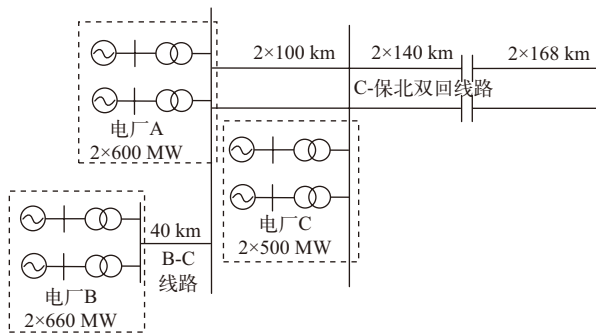


图1 电厂C所在的网架结构图

Fig. 1 Grid structure diagram of C power plant

交流串补输电系统可能导致次同步谐振问题, 会威胁电厂C机组的安全运行; 严重时, 可导致发电设备损坏, 影响送端电网的安全稳定运行, 从而影响到负荷中心的安全生产^[4-5]。从此角度来说, 对电厂C进行次同步振荡风险及抑制措施研究分析也是有必要的。

1 次同步振荡风险评估

1.1 仿真参数选择

线路仿真参数见下表1。

研究对象电厂C 1[#]、2[#]机组为同型机组, 本文所列参数均为1[#]机组参数, 机组发电机电气参数见表2。

表1 线路仿真参数

Tab. 1 Line simulation parameters

线路	序参数	电阻 / (Ω/m)	电抗 / (Ω/m)	电容 / ($\text{M}\Omega/\text{m}$)
C-保北	正序	1.83×10^{-5}	2.69×10^{-4}	270.28
	零序	1.83×10^{-5}	6.86×10^{-4}	370.06
A-C	正序	1.83×10^{-5}	2.69×10^{-4}	270.28
	零序	1.83×10^{-5}	6.86×10^{-4}	382.58
A-B	正序	2.11×10^{-5}	2.69×10^{-4}	223.90
	零序	2.03×10^{-4}	7.25×10^{-4}	324.81

表2 机组发电机电气参数

Tab. 2 Electrical parameters of the generator unit

序号	参数名称	参数取值
1	额定容量/($\text{MV} \cdot \text{A}$)	588
2	定子电压/kV	20
3	额定功率因数	0.85
4	直轴同步电抗(不饱和) $X_{\text{du}}(\%)$	311
5	直轴同步电抗(饱和) $X_{\text{d}}(\%)$	266
6	直轴瞬变电抗(不饱和) $X'_{\text{du}}(\%)$	32
7	直轴瞬变电抗(饱和) $X'_{\text{d}}(\%)$	28
8	直轴超瞬变电抗(不饱和) $X''_{\text{du}}(\%)$	26.5
9	直轴超瞬变电抗(饱和) $X''_{\text{d}}(\%)$	22.5
10	直轴开路暂态时间常数 T'_{do}/s	6.9
11	直轴开路次暂态时间常数 T''_{do}/s	0.02

电厂C机组的模态频率见表3。

表3 机组轴系模态频率

Tab.3 Modal frequency of unit shaft system

(单位: Hz)			
阶次	一阶	二阶	三阶
模态频率	16.5	28.1	32.3

简单集中质量模型在主机厂提供的基础上, 根据模态频率进行微调后建模, 建模后的质量模型见表4。

表 4 机组轴系简单集中质量模型
Tab. 4 Simple concentrated mass model of unit shaft system

集中质量模块	等效惯量 $GD^2 / [M_i / (kg \cdot m^2)]$	功率占比 (%)	等效刚度 $k_{i+1} / (N \cdot m / rad)$
高压转子 HP	3 045	28.29	66 246 000 127 126 000 174 697 000 148 071 000
中压转子 IP	9 850	35.02	
低压 A 转子 LPA	56 288	17.94	
低压 B 转子 LPB	56 288	18.76	
发电机转子 GEN	36 076	-	-
励磁机转子 EXC	856	-	-

1.2 复转矩系数法分析

复转矩系数是由文献[6-7]提出的描述汽轮发电机组次同步振荡特性的名词。复转矩系数法是一种分析汽轮发电机组次同步振荡问题的基本方法。

复转矩系数法时域仿真时，可将机械部分和电气部分分别计算。在计算电气部分的复转矩系数时，轴系采用单刚体模型，发电机电气部分采用完整的数学模型，电力网络采用电磁暂态模型，HVDC和FACTS装置采用考虑开关过程的真实模型，并考虑HVDC和FACTS装置的控制器。其步骤及方法介绍详见文献[8-10]。

本文仿真的运行工况考虑C-保北双回500 kV线路及串补、A-B单回500 kV线路、A-C双回500 kV线路和A、B、C三个电厂开机及出力，并在三个电厂各两机并网的方式下，分别考虑系统线路全接线、N-1、N-2的运行方式，运行方式粗略计为108个。

仿真结果表明，在108个方式中共有78个方式模态电气阻尼为负值，占比为72.2%，电厂C机组3个模态中，所有方式下模态1电气阻尼为正值；全接线方式、C-保北退出一回线路、A-C线路退出方式时，各种开机组组合方式模态2呈现负阻尼特性；A-C线路退出，开机少于4台时，模态3呈现负阻尼特性。可知，电厂C机组面临严重的次同步谐振问题。

本文从78个方式中选择四种典型工况展示其仿真结果，见表5。表5中，A、B、C表示三个发

电厂，0代表两台机组停机，一空代表一台机组起机且空载，一半代表一台机组起机且半载，2代表投入两个元件，1代表投入一个元件。表中的4种工况中，C-保北的串补及A-B线路均正常运行，电厂C均为2[#]机组退出，1[#]机组空载，此四种工况电厂C1[#]机组扭振发散严重，工况28及31的电气阻尼曲线如图2、图3所示。

表 5 4 种典型工况仿真结果
Tab.5 Simulation results of four typical operating conditions

工况	发电机			线路		1 [#] 机组电气阻尼值		
	C	A	B	C-保北	B-C	模态 1(pu)	模态 2(pu)	模态 3(pu)
28	一空	0	一空一半	1	2	0.81	-0.99	0.01
31	一空	一半	一半	1	2	2.05	0.18	-1.88
32	一空	0	一空一半	1	1	0.89	-0.67	0.12
68	一空	一半	一半	1	1	0.77	-0.20	-0.17

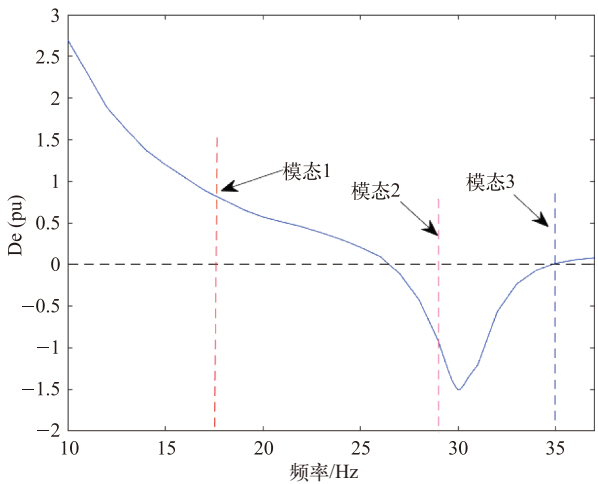


图 2 工况 28，电厂 C 1[#] 机组电气阻尼曲线
Fig. 2 Electrical damping curve of unit 1[#] C power plant in working condition 28

由图2可知，在频率26.54~34.94 Hz范围内，机组轴系模态呈现电气负阻尼特性；机组轴系3个模态的电气阻尼分别为De_M1=0.81(pu)、De_M2=-0.99(pu)和De_M3=0.01(pu)，机组轴系模态2在该负阻尼频率段范围内。

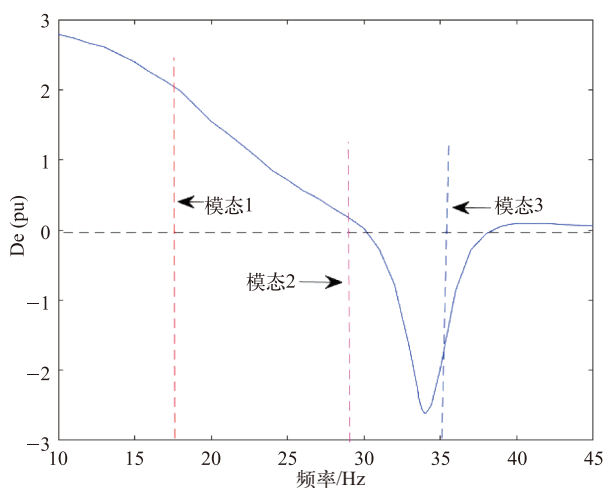


图3 工况31, 电厂C 1#机组电气阻尼曲线

Fig.3 Electrical damping curve of unit 1# in c power plant in working condition 31

从图3可知, 在频率30.45~37.98 Hz范围内, 轴系模态呈现电气负阻尼特性, 机组轴系3个模态的电气阻尼分别为 $De_M1=2.05(pu)$ 、 $De_M2=0.18(pu)$ 、 $De_M3=-1.88(pu)$, 机组轴系模态3在该负阻尼频率段范围。

由此可知, 机组模态2、模态3均存在负阻尼的工况。

1.3 时域仿真分析

为了进一步分析电厂C机组次同步振荡的情况, 本文同时采用时域仿真法对上述研究结论进行验证, 研究了在故障扰动下, 机组各质量块转速的振荡情况。考虑的研究条件如下:

(1) 故障类型

故障类型选择单相短路瞬时接地故障, 故障位置在电厂C-电厂A 500 kV线路C侧。

(2) 机组开机方式

电厂A、B、C机组各一空一半, 对应的机械阻尼系数空载为0.01, 半载为0.05。在此基础上考虑上述机组的投退。所有机组均未加抑制措施。

(3) 系统运行工况

在电厂A、B、C各两机并网方式下, 分别考虑系统线路全接线、N-1、N-2的运行方式。投

退元件包括线路以及串补。

由于汽轮机组的次同步谐振风险与机组投运情况、系统运行方式密切相关, 考虑到实际机组与系统的运行方式众多, 故需要设定系统的边界运行方式, 形成分析评估的方式组合集合, 以包含系统的各种实际运行情况。方式组合集合根据机组投运组合、机组出力水平、接入系统的线路与串补运行方式等情况设定。本文仿真考虑电网、机组等运行情况的共计5 859种工况。

通过时域仿真法分析后, 发现: ①在无次同步谐振抑制措施的情况下, 多种工况下存在机组轴系发散风险; ②C-保北线路双线带串补、单线带串补时, 机组发生次同步谐振风险大; ③当一回串补旁路时, 风险减小, 但仍存在12种发散工况。

上述③所述的12种发散工况中有4种工况与1.2节表5所罗列的工况一致, 下文重点呈现, 此4种工况下1#机组的原始转速信号及模态转速信号的发散和收敛结果见表6。

表6 电厂C 1#机组次同步谐振时域仿真结果

Tab. 6 Time domain simulation results of sub synchronous resonance of unit 1# in power plant C

工况	原始转速	dw1	dw2	dw3
28	发散	收敛	发散	收敛
31	发散	收敛	发散	收敛
32	发散	收敛	发散	发散
68	发散	收敛	发散	发散

工况28的机组原始转速曲线和模态转速曲线如图4、图5所示。

由于电厂A、B与电厂C电气距离较近, 且电厂A、B机组与电厂C机组为非同型机组, 本项目对电厂A、B机组进行收资研究, 电厂A的模态频率为18.47 Hz和25.4 Hz, 电厂B的模态频率为13.5 Hz和26.1 Hz。此两电厂模态频率与电厂C模态频率差值接近2 Hz, 电厂A、B与电厂C的轴系扭振交互作用很弱, 经仿真分析后验证A、B两电厂无扭振风险, 故本项目不考虑电厂A、B的扭振控制措施。

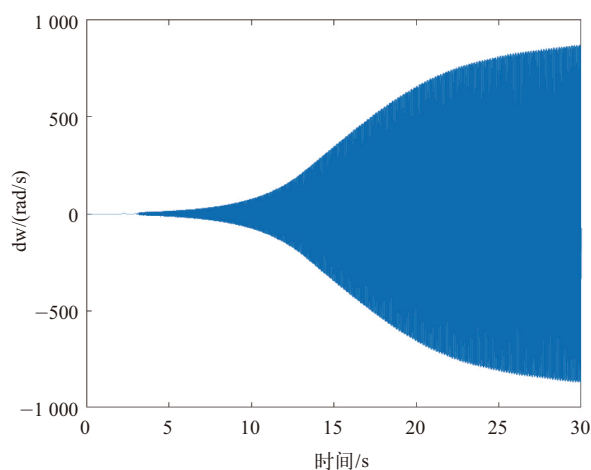


图4 1#机组原始转速曲线

Fig. 4 Original speed curve of unit 1

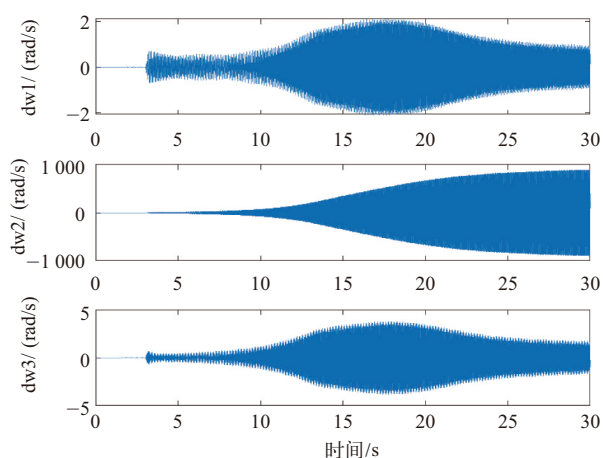


图5 1#机组模态转速曲线

Fig. 5 Modal speed curve of unit 1

2 工程配置及应用

2.1 工程配置分析

GTSDC是一种基于电力电子变流技术的多模态次同步阻尼控制装置^[11-13]。GTSDC上侧控制器通过转速传感器实时检测发电机组轴系转速信号,并计算转速偏差,再将此转速偏差作为反馈信号,GTSDC装置根据从转速差信号装置解调出的模态振荡幅值,输出与轴系扭振模态频率互补的补偿电流参考值到就地功率控制单元;就地功率控制单元输出的电流信号动态跟踪该参考

值,并向电网注入次同步频率电流信号。通过适当设置GTSDC的控制参数,即可产生与轴系扭振频率一致且起阻尼作用的电磁转矩增量,并实时调整转速偏差到极小范围内,从而实现抑制次同步谐振的目的。使用GTSDC抑制后的轴系模态幅值均小于0.1 rad/s。GTSDC装置的控制原理如图6所示。

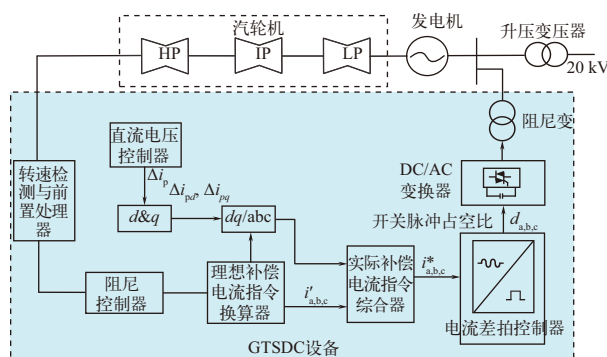


图6 GTSDC的控制原理图

Fig. 6 Control schematic diagram of GTSDC

为了得到电厂C配置GTSDC的详细方案,明确抑制措施容量,本文使用PSCAD软件按照图6所示的原理搭建仿真模型,对GTSDC的容量进行校核,仿真分析的工况为1.2节中发散较为严重的78种工况,故障点与1.3中一致,进行增加抑制措施后的仿真分析。

由于电厂C机组较老,励磁系统未进行改造,不具备4~20 mA电流的接口,因此,本项目中不考虑附加励磁阻尼控制器的建模仿真^[14]。模型搭建时按照在机端接入GTSDC设备,并逐渐增加GTSDC容量的原则进行。以1.2节中78工况的收敛性为标准进行容量校核,当电厂C的两机收敛工况占比达100%,且产生轴系疲劳累计的工况占比为0时,此配置方案为可行方案。

重点仿真的几种配置及1#机组的收敛工况占比。当1#、2#机组GTSDC配置为机端各接入 $2 \times 14 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 容量及单机接入 $30 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 容量时,1#机组收敛工况占比均可达100%,产生的轴系疲劳累计的工况占比均为0。

表 7 不同配置下 1[#] 机组收敛及产生疲劳工况占比Tab. 7 Proportion of convergence and fatigue conditions generated by 1[#] under different configurations

序号	单机 GTSDC 容量配比 (MV·A)	投退情况	收敛工 况占比 (%)	产生疲劳累 计的工况 占比 (%)
1	24	全投	89.7	32.1
2	26	全投	96.2	20.5
3	28	全投	100	0
		一台机组退出 一台机组投入	97.4	6.4
4	2×14	全投	100	0
		一台退出 14 MV·A 一台全投	100	0
5	30	全投	100	0
		一台机组退出 一台机组投入	100	0

GTSDC抑制设备的容量决定一次设备中电容的体积、功率模块的数量和功率柜的数量,结合设备成本、冗余性、易维护性和工程实施等方面,单台机组2×14 MV·A抑制容量优于单机30 MV·A抑制容量方案。

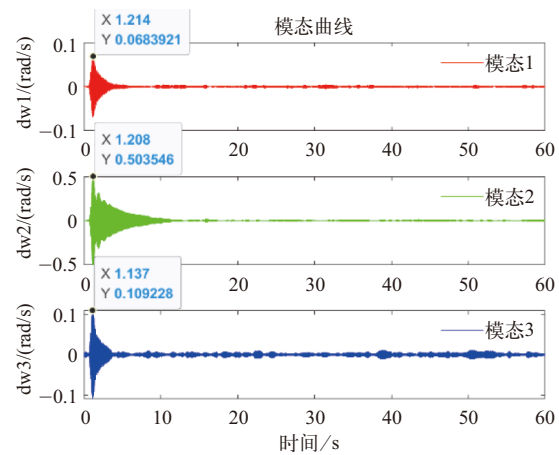
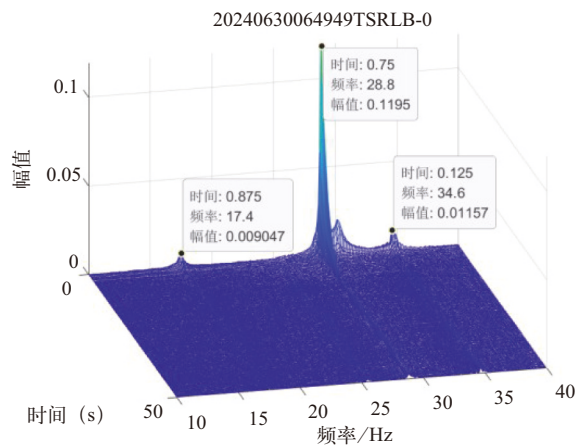
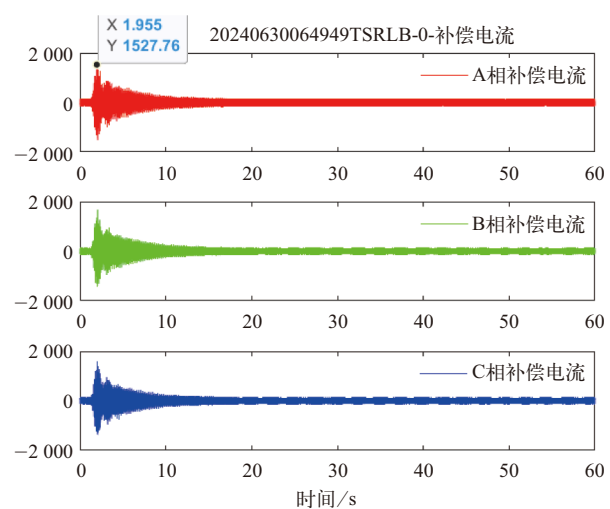
单机2×14 MV·A抑制容量在国内实施案例中属于较大容量,结合工程经验,GTSDC的接入方式有两种:机端接入和厂用变压器低压侧接入,厂用变压器接入时涉及厂用侧的分流,此时通常需要增加GTSDC容量,此方案对高压厂用变压器的容量也有要求,且GTSDC发出的谐波对厂用系统也会有影响。综合上述因素,为保障工程实施及工程应用的可靠性,最终选定机端2×14 MV·A方案为可行性工程方案。该工程于2024年4月投产运行。

2.2 应用效果

2024年6月30日06时49分49秒,1[#]机组GTSDC发生抑制事件,并形成录波文件,此期间电厂C 2[#]机组停机检修。

对此次事件进行分析后得知,抑制事件发生时刻网侧投入图1中的双回线路串补,串补的投入使正在运行的1[#]机组轴系产生扭振。如图7所示,串补投入时刻模态2幅值激发到0.5 rad/s,随后在5 s内从0.5 rad/s降低到0.05 rad/s,GTSDC

瞬时输出最大抑制电流约1 528 A,并随模态2幅值衰减后,抑制电流输出逐步降低。

(a) 1[#] 机组轴系模态曲线(b) 1[#] 机组模态曲线频谱

(c) GTSDC 输出电流

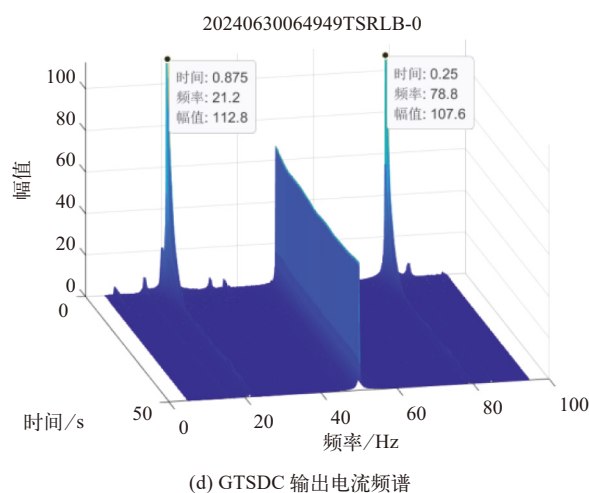


图 7 1# 机组 GTSDC 响应曲线图

Fig. 7 Response curve diagram of unit 1 GTSDC

此次事件一方面验证了电厂C在网侧有扰动时容易发生扭振，且存在次同步振荡风险；另一方面验证了在电厂C单机在线，两回线路串补引发机组轴系扭振时，在GTSDC装置的抑制作用下，电厂C单台机组模态幅值可被快速控制在较低水平。

对此次事件机组轴系的疲劳累计进行分析查看后，发现在GTSDC控制作用下，模态2快速收敛，此次振荡未对机组轴系产生疲劳累计。1#机组疲劳累计总值的显示界面如图8所示，疲劳累计总值为0。

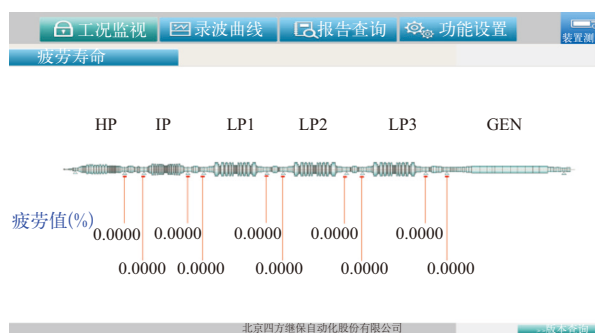


图 8 1# 机组疲劳累计总值

Fig. 8 Accumulated total fatigue value of unit 1

3 结束语

本文以山西某火电厂为研究对象，采用复转矩系数法及时域仿真法分析了该电厂存在的次同步振荡风险。采用PSCAD建模仿真的方式

确定C电厂GTSDC的工程配置方案为机端接入 $2 \times 14 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 容量的GTSDC设备。

通过2024年6月30日录波分析情况可知，电厂C机组存在次同步振荡风险，采用本文确定的工程配置方案，系统侧发生扰动引起机组轴系扭振时，GTSDC装置可以快速响应，根据模态振荡幅值输出抑制信号，有效抑制机组轴系扭振，并使振荡快速收敛，有效保障了电厂C机组的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 张帆. 电力系统次同步振荡抑制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [2] 肖湘宁, 郭春林, 高本锋, 等. 电力系统次同步振荡及其抑制方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [3] 王洋洋. 次同步谐振分析及控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [4] 谢小荣, 王路平, 贺静波, 等. 电力系统次同步谐振/振荡的形态分析[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1043-1049.
- [5] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 38(10): 2821-2828, 3133.
- [6] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101 (10): 3630-3638.
- [7] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine part II: application to an arbitrary network [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3639-3647.
- [8] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(一): 模型结构[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1378-1388.

- [9] 刘月正. 大型火电机次同步谐振/振荡保护控制方法分析[J]. 内蒙古电力技术, 2021, 39(6): 73-77.
- [10] 高俊, 丁洪发. 典型FACTS元件抑制次同步谐振研究综述[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(5): 45-50.
- [11] 马静, 沈雅琦, 杜延菱, 等. 适应宽频振荡的风电并网系统主动阻尼技术综述[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1673-1686.
- [12] 刘燕, 康积涛. 含有STATCOM的电力系统次同步谐振研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 38-40.
- [13] 姜齐荣, 王亮, 谢小荣. 电力电子化电力系统的振荡问题及其抑制措施研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1057-1066.
- [14] 张治, 扈娟, 赵伟华, 等. SEDC在抑制鄂温克电厂次同步振荡中的应用[J]. 东北电力技术, 2016, 37(10): 49-52, 55.

作者简介

母雪东(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统保护及直流配电技术。

(收稿日期: 2024-12-23)