

新能源经柔直送出系统的次同步振荡分析与抑制

李浩志¹, 谢小荣^{1*}, 刘芮彤², 姜齐荣¹

(1. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学电机系), 北京市海淀区 100084;

2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁省 沈阳市 110006)

Analysis and Mitigation of the Subsynchronous Oscillation in Renewable Energy System Connected to the MMC-HVDC

LI Haozhi¹, XIE Xiaorong^{1*}, LIU Ruitong², JIANG Qirong¹

(1. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110006, Liaoning Province, China)

ABSTRACT: During September and October 2022, 2~6 Hz sustained oscillation occurred in a renewable energy system connected to the modular multilevel converter-based high voltage DC (MMC-HVDC) in Northern China, which caused frequent tripping of the doubly-fed induction generators (DFIGs) and equipment damages. The equivalent impedance network models are established using the field recorded data to explain the cause of the oscillation. To mitigate the oscillation, inserting the subsynchronous suppression filter in the DFIG converter control is proposed. The parameter is designed using the measured data, and then field implementation and tests are conducted. Field test results under different operating conditions validate that the proposed method can effectively mitigate the oscillation without any adverse effect on normal operation. It is confirmed the proposed scheme is easy to design and implement, providing an efficient and practical solution for similar issues.

KEY WORDS: renewable generation; multilevel converter-based high voltage DC; subsynchronous oscillation

摘要: 2022年9—10月份,我国华北地区某新能源经柔直送出系统出现了2~6 Hz的持续振荡,导致风电机组频繁脱网和设备损坏。该文利用现场录波数据建立系统等效阻抗网络模型,解释次同步振荡的发生原因。为解决该问题,提出在风电机组变流器控制中嵌入次同步陷波环节的振荡抑制方法,依据实测数据进行参数设计,并进行现场实施与测试。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202199515A-0-5-ZN): “双高”电力系统稳定性控制理论和方法研究。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202199515A-0-5-ZN): Research on Stability Control Theory and Method in Power System with High Penetration of Renewables and Power Electronics.

多种工况下的实测结果表明,次同步陷波环节可有效抑制振荡且不影响风电机组的正常运行。该方法易于设计和实现,为解决类似问题提供一种高效实用的方案。

关键词: 新能源发电; 柔性直流输电; 次同步振荡

0 引言

为了清洁、低碳地利用能源,电力系统中经变流器接入的新能源发电机组越来越多;基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流(简称“柔直”)输电技术也被广泛用于传输可再生能源电力。然而,电力电子设备比例的升高带来了新的系统稳定性问题,比如,宽频电磁振荡^[1]。此前双馈风电场经柔直并网系统调试时发生了次同步振荡现象,引发广泛关注和研究。2020年9—10月,华北地区已投运的新能源经柔直送出系统也发生了次同步振荡,引起风电机组脱网和设备损坏。针对此类振荡现象的建模分析,文献[2]主要考虑MMC内部动态,推导了换流站内次同步电流的分布和传播;文献[3-5]推导MMC交流侧阻抗模型,文献[3]主要分析电压前馈控制的影响,文献[4]考虑陆上和海上换流站控制环节直流电缆的影响,揭示海上风电和柔直之间相互作用,文献[5]建立双馈风电机组和柔直送端换流站的阻抗模型,并用等效电路解释了振荡机理;文献[6]建立谐波状态空间模型,得到送端换流站阻抗特性表明其在较低频率范围内存在谐振峰;文献[7]建立阻抗模型后,采用谐振模式分析方法对海上双馈风电机组经

柔直送出系统进行分析;文献[8]根据特征值分析确定振荡模式,并计算各状态变量的参与因子。针对次同步振荡的抑制,已有大量文献提出电网侧或者机组侧的措施,电网侧方法包括增加专用变流器^[9],改造柔性交流输电设备^[10]和柔直系统变流器等^[6,11]。由于运营主体不同,风电场业主通常无权要求电网进行改造,电网侧措施也可能需要大范围停运或者增加设备,成本也较高。机组侧措施一般包括:调整比例积分控制参数^[12]、更换控制方法^[13-14]和附加控制环节^[15-17]。但是调整PI控制参数可能会影响变流器正常运行和动态性能;更换控制方法需要重新编写控制程序,非线性控制方法的实现难度大、所需时间长。附加阻尼控制环节需要对阻尼环节参数进行优化设计,研究表明其控制参数或输入信号选择不当可能引发新的振荡^[18]。另外,有研究提出在控制中附加陷波环节来抑制振荡^[19-20],比如文献[20]针对双馈风电接入串补电网场景,理论分析了陷波环节增强振荡模式阻尼的作用,但目前此类方法尚未付诸实践,其抑制效果还有待验证^[21]。

目前,新能源发电与柔直系统间相互作用引发较低频率的振荡现象少有报道。由于实际系统包含风电、光伏及柔直换流器等多种电力电子装备,涉及不同设备供应商和运营主体,难以准确获取详细建模所需的控制结构及参数,为振荡的分析与抑制带来了更大的挑战。

本文主要利用现场数据对实际系统中新型振荡现象的发生原因进行分析;继而提出基于次同步陷波环节的抑制措施,根据实测数据而不是系统详细模型进行参数设计,实践表明,该方法适用于变流器控制和参数难以获取的实际系统;最后进行现场试验,验证了抑制效果,也证明了陷波环节具有实现简便、成本较低的优势。虽然关于次同步振荡抑制已有大量理论和仿真研究,但现有研究很少在现场开展类似的抑制试验。现场测试结果有望为解决实际工程中的次同步振荡问题提供重要经验。

1 目标系统和振荡事件介绍

新能源经柔直送出系统的结构如图1所示,三龙口光伏电站和马头山风电场经220kV线路接入到柔直送端的中都换流站,为受端换流站连接的负荷中心供电。其中,光伏电站的容量约210MW;风电场容量为153MW,包括45台相同型号

(0.69/35kV)升压后分别接入风电场内的6条35kV集电线,再接入到2条汇集母线,然后升压到110kV送出,每条汇集母线均安装了静止无功发生装置(static var generator, SVG)。双馈风电机组的结构如图2所示,主要包括感应发电机、转子侧变流器(rotor side converter, RSC)及其控制系统、网侧变流器(grid side converter, GSC)及其控制系统、斩波电阻(chopper resistor)。变流器控制采用dq解耦控制,RSC外环控制有功功率和无功功率,GSC外环控制直流母线电压和无功功率,内环均为电流控制环。

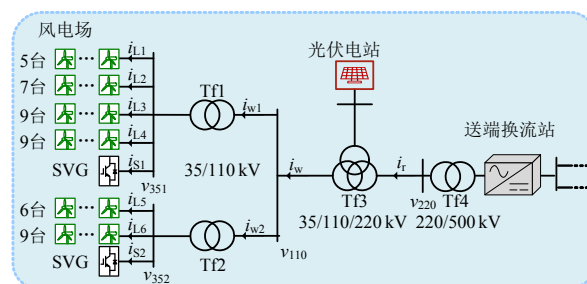


图1 新能源经柔直送出系统

Fig. 1 Renewable energy system connected to MMC-HVDC

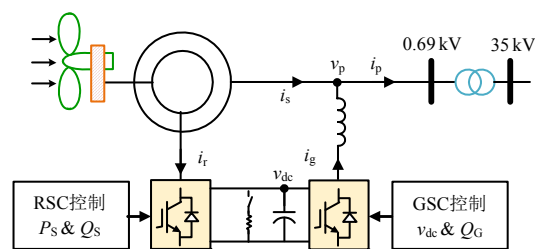


图2 双馈风电机组结构

Fig. 2 Structure of DFIG

在新能源系统并网投运后,风电机组因振荡引起的chopper电阻动作次数超限而频繁脱网。风电机组脱网前变流器的故障录波数据如图3所示,并网点电压 v_p 、并网点输出电流 i_p 、直流母线电压 v_{dc} 、转子侧电流 i_r 都存在持续的等幅振荡,除并网点电压外,波形畸变非常严重。快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析结果见图4,并网点输出电流中包含有次同步(4 Hz)和超同步(96 Hz)分量,4 Hz分量远大于基波分量,96 Hz分量相比于4 Hz分量可以忽略。转速680 r/min对应的电频率为34 Hz,转子侧电流中除了对应工频的16 Hz分量,还存在对应振荡频率的30 Hz分量。由于dq坐标变换,直流母线电压中含有互补频率46 Hz分量,幅值过高触发了chopper保护动作。直流电压和转速波动导致部分机组的chopper电阻和联轴器

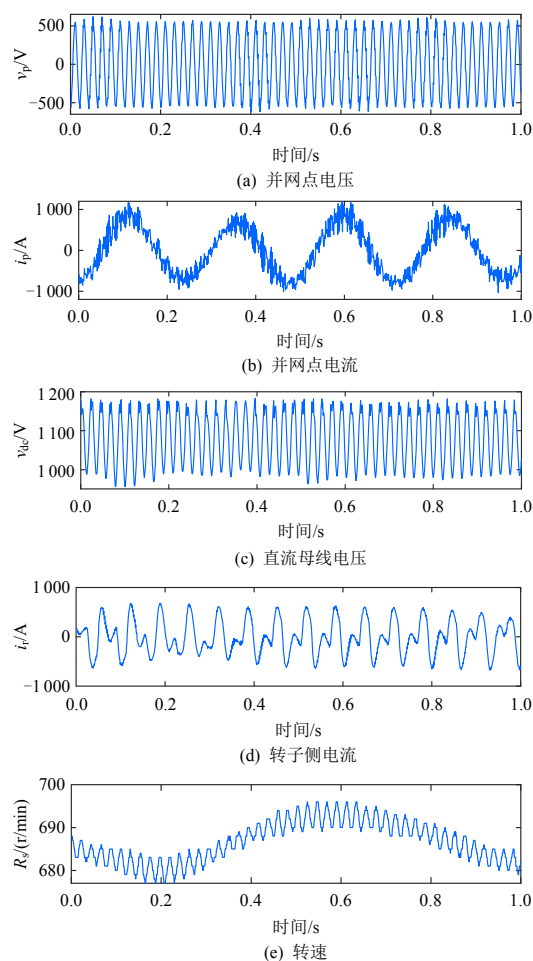


图 3 双馈风电机组故障录波

Fig. 3 Fault record of the DFIG

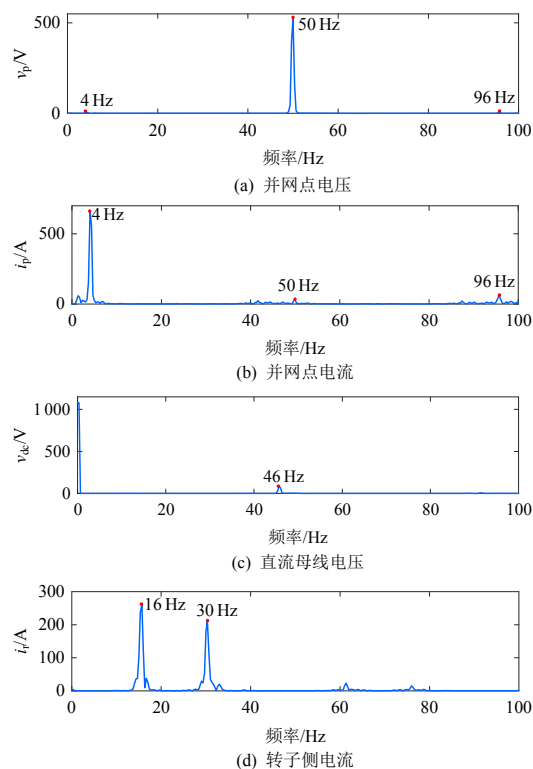


图 4 双馈风电机组故障录波的 FFT 分析结果

Fig. 4 FFT result of DFIG's fault record

损坏,也造成了电量损失。与此前报道的振荡事件不同,双馈风电机组在附近电网没有串补的情况下发生较低频率振荡,振荡机理尚不明确,缺乏有效的抑制措施。

2 次同步振荡特性与发生原因分析

2.1 振荡特性分析

通过对多次振荡事件的数据进行分析,归纳振荡的特征。收集的数据包括振荡发生时不同电压等级线路的录波数据、风电机组变流器的录波数据,以及风速、光照强度等工况信息。

振荡发生的时间均在 18:00—次日 06:00 左右的范围内,即为当地日落之后和日出之前,该时间段内光伏电站因光照强度较低,有功输出几乎为零。因此,可以推知振荡主要是由风电场和柔直换流站之间的相互作用引发的。

振荡发生时风速普遍较低,测风塔记录的风速在 3 m/s(风电机组的切入风速)附近,整个风电场的出力一般在额定容量的 10%以下,94%的振荡事件发生在风电场有功功率低于 5 MW 时。振荡发生时的机组数量范围为 2~40 台,难以总结出台数对振荡是否发生的影响。

振荡发生时的频率范围在 2~6 Hz 之间,频率低于其他柔直相关的振荡事件。这一频率高于机组轴系自然扭振模式的频率,可以排除机械系统引发振荡的可能。振荡发生时,在不同电压等级线路中存在相同频率分量。对振荡时的 220 kV 线路电流进行滤波和 FFT 分析,结果如图 4 所示,振荡过程如图 5 所示。振荡起始阶段,电流中次同步分量幅值较小;50 s 左右,随着基波电流幅值轻微下降,次

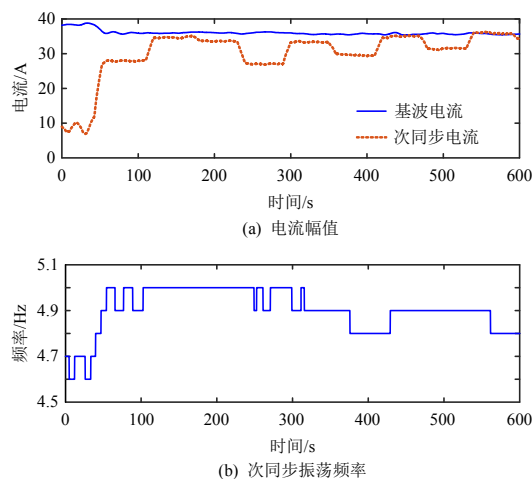


图 5 振荡过程分析

Fig. 5 analysis of the oscillation

同步电流迅速发散；然后次同步电流在较高的幅值附近波动，该时段在运的27台风电机组中有3台跳闸，基波电流幅值变化不大；录波结尾次同步电流有减小趋势，后续时间段无脱网事故记录，可以推断次同步电流随后逐渐收敛。

2.2 次同步振荡发生原因

为分析次同步振荡发生的原因，利用振荡时的电压、电流录波数据得到次同步频率分量，计算系统的次同步等效阻抗：

$$Z_s = \dot{U}_s / \dot{I}_s = R_s + jX_s \quad (1)$$

式中： $\dot{U}_s$ 和 $\dot{I}_s$ 代表振荡频率的电压和电流分量； R_s 和 X_s 代表次同步频率下的等效电阻和电抗。

由振荡特性分析可知，应主要考虑风电场和柔直系统之间的相互作用。利用机组内部和不同电压等级线路的电压、电流数据，分别计算各部分阻抗并进行串并联，风电机组、风电场和柔直系统在振荡频率下的等效阻抗可表示为图6。可见，由于双馈风电场等效为具有负电阻的感性阻抗 Z_W 和柔直系统在送端换流站的等效阻抗 Z_M 为正电阻和电容串联，风电场和柔直系统形成了RLC二阶负阻尼谐振电路，引发了不稳定的次同步振荡现象。图6中系统等效电路和文献[5]中阻抗建模的结果一致，基于现场数据和理论研究的结果均证实了双馈机组和柔直系统间相互作用可能产生振荡模态。在次同步频率下，双馈风电机组的转差率 s_r 为

$$s_r = (\omega_{\text{sub}} - \omega_r) / \omega_{\text{sub}} < 0 \quad (2)$$

式中： ω_r 代表转子转速； $\omega_{\text{sub}} = 2\pi f_{\text{sub}}$ 代表定子电流中的次同步频率。通常转速对应频率高于次同步振荡频率，如图3中风电机组转速对应电气频率为34 Hz左右，则转差率为负。

结合图6的分析结果，在特定条件下，柔直换流器可能呈现“电容”外特性，和双馈风电场及线路等效电抗存在一个自然谐振模式，频率和LC串联谐振回路的参数有关。则在系统受到扰动后，双馈机组定子回路会产生振荡频率电流，该频率下转差率为负，导致转子等效电阻为负值，当该负电阻绝对值大于机组其他部分、线路和柔直系统等值电阻时，整个互联系统电阻值为负值，产生不稳定的振荡现象。对应图6中单台机组的阻抗结果，转子等效电阻为负，导致从机组的定子侧看入的阻抗 Z_s 为负，串并联之后机组对外也呈现负电阻。由于 Z_s 表示的是电机和RSC及其控制的等效阻抗，除了经典的感应发电机效应，RSC控制环节也参与导致了负电阻的产生^[22]，提供了额外的负阻尼。此外，GSC及其控制对应的 Z_G 虽为正电阻，但计算得到的 Z_G 阻值较大，经过并联操作后其对风电机组外特性的影响相对更小。

虽然数据分析表明风电机组等效阻抗呈现负电阻是因为变流器控制参与的感应发电机效应，与双馈风电机组和串补交流电网的相互作用类似；但系统中并无串补接入，是柔直换流站提供了谐振中的“电容”。现有研究表明，柔直换流站在低频段的阻抗特性受到直流侧、锁相环、外环控制、环流控制和子模块电容等环节的影响^[23]，由于不能准确获知柔直系统的控制策略和参数，难以确定柔直换流站呈现“电容”特性的原因和影响因素。本文只是通过分析实测数据，确定柔直换流站在振荡频率下呈现“电容”的等效外特性，这正是引发振荡的关键因素之一。

3 嵌入次同步陷波环节的振荡抑制方法

3.1 抑制原理

结合现场数据和理论研究可知，风电机组变流器控制与柔直换流站之间的相互作用是导致次同步振荡发生的关键，前者的控制环节并非针对次同步频率设计，会在感应发电机效应导致负电阻的基础上提供额外的负电阻。风电机组的RSC控制结构如图7所示，GSC也采用相似的控制结构。当特定

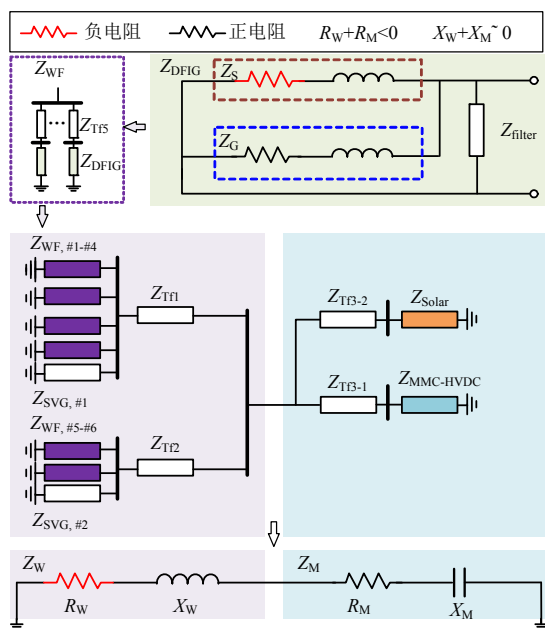


图6 系统在振荡频率的等效阻抗

Fig. 6 Equivalent impedance of the system at the oscillation frequency

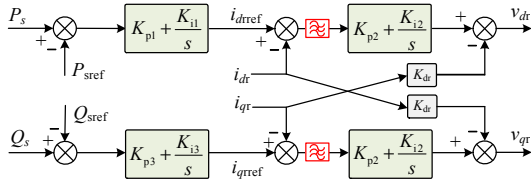


图 7 双馈风电机组变流器控制结构

Fig. 7 Structure of the DFIG converter control

频率范围内柔直呈现电容特性, LC 谐振将会激发次同步电流分量。由于谐振频率较低, 转差率为负, 进而导致从机端母线处等效的转子电阻为负值, 如果该负电阻能抵消掉电枢绕组电阻和电网电阻之和, 系统将等效为含有负电阻的谐振电路, 产生不稳定的振荡现象。研究表明, 双馈风电机组 RSC 的电流内环比例增益 K_{p2} 对次同步振荡模式阻尼影响最大^[5,24-25], K_{p2} 对应的等效转子电阻增量可近似为

$$R_{r_RSC} = K_{p2} / s_r \quad (3)$$

式中: K_{p2} 一般为正数; 如果转差 s_r 为负, R_{r_RSC} 为负数。因此, 抑制振荡的关键是消除或减小 R_{r_RSC} 。由于转差 s_r 只和电机转速 ω_r 、振荡频率 ω_{sub} 有关, 转速由机组主控下发, 难以人为调控转差, 因此, 只能调整增益 K_{p2} 的频率特性, 即不改变工频信号的增益而仅降低振荡频率处的增益。通过在风电机组变流器控制系统中“嵌入”次同步陷波环节来实现这一功能。如图 7 红色方框所示, 陷波环节与 RSC 内环 PI 环节串联, 则 RSC 内环控制对应的等效转子电阻增量可表示为

$$R_{r_RSC} = K_{p2} H(s) / s_r \quad (4)$$

式中 $H(s)$ 为陷波环节的传递函数。

如果将次同步陷波环节的特征频率设置为振荡频率, 在该频率处, R_{r_RSC} 显著降低, 即减弱变流器控制对系统次同步振荡的参与作用, 实现振荡的抑制。

3.2 次同步陷波环节设计

在实际工程中实施次同步陷波环节, 需要满足: 陷波环节为振荡模式提供足够的阻尼, 且不影响变流器工频动态性能; 易于实施和测试; 能适应复杂多变的运行工况。为简化设计, 可选择二阶带阻滤波器作为次同步陷波环节:

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_c^2}{s^2 + 2\pi B_f s + \omega_c^2} \quad (5)$$

式中: ω_c 为特征频率; B_f 为带宽。

采用双线性变换进行离散化后的传递函数^[26]如式(6)所示。

$$H(z) = \frac{A_1 z^2 + A_2 z + A_3}{B_1 z^2 + B_2 z + B_3} \quad (6)$$

式中: $A_1 = A_3 = 4f_s^2 + \omega_c^2$; $A_2 = 2\omega_c^2 - 8f_s^2$; $B_1 = 4f_s^2 + \omega_c^2 + 2B_f f_s$; $B_2 = A_2$; $B_3 = B_1 - 4B_f f_s$; f_s 为控制采样频率。

二阶滤波器只需设计特征频率 ω_c 和带宽 B_f 2 个参数。为了控制的有效性和鲁棒性, 需要先分析实际振荡事件中振荡频率变化情况。振荡时的工况统计表明, 振荡仅发生在光伏退出运行, 风电场平均风速在启动风速附近, 且发生振荡时对应总功率大多在总装机容量的 10% 以下。因此, 在现有系统结构下, 存在振荡风险的工况变化范围已经基本确定, 振荡频率几乎不会超出已有统计结果。特征频率根据振荡频率范围 2~6 Hz 的中位数 4 Hz 进行设计, 由于采用 dq 坐标系下的控制方法, $\omega_c = 2\pi \times 46 \text{ rad/s}$; 带宽选为 10 Hz, 既覆盖了已发生的振荡频率范围, 也留有一定的裕度。

参数设计步骤可以总结为: 1) 通过现场数据和/或模型分析目标系统次同步振荡特性, 明确在各种运行工况下频率变化范围; 2) 根据振荡频率范围的中间值和实际系统中振荡事件频率的分布确定特征频率; 3) 根据振荡频率范围和特征频率确定带宽, 满足 $[\omega_c/(2\pi) - B_f/2, \omega_c/(2\pi) + B_f/2]$ 覆盖可能的振荡频率范围并留有一定裕量; 4) 根据仿真和试验结果调整参数。

4 现场测试

4.1 次同步陷波环节对故障电压穿越性能的影响

次同步陷波环节仅影响机组在振荡频率附近的动态特性, 不影响变流器的故障电压穿越性能。在现场实施前有必要分析陷波环节对电压穿越性能的影响, 为此, 对变流器控制器进行硬件在环仿真测试。建立的故障电压穿越性能测试平台如图 8

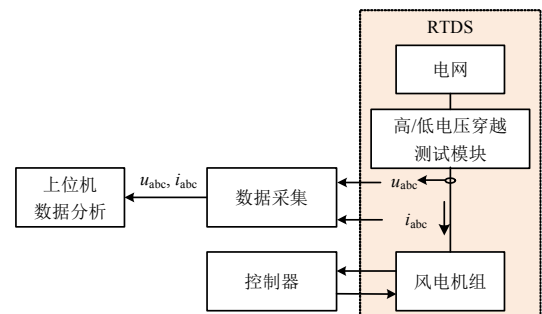


图 8 故障电压穿越测试平台

Fig. 8 Structure of fault voltage ride through test platform

所示, 主要包含3部分: 1) RTDS中的电网模型; 2) 待测控制器; 3) 信号采集和分析。控制器和RTDS之间通过电缆实现信号传输; RTDS及上位机之间采用网线实现数据传输; 硬件在环测试系统如图9所示。



图9 基于RTDS的硬件在环测试系统

Fig. 9 RTDS based hardware-in-the-loop test system

改变电压跌落幅值和风电机组功率, 根据GB/T 36995-2018《风力发电机组故障电压穿越能力测试规程》要求, 对“嵌入”陷波环节后的变流器进行多组低电压穿越、高电压穿越测试。机组运行在额定功率, 电压跌落至0.2 pu和升高至1.2 pu的测试结果分别见图10和11。在附加陷波环节前后, 风电机组电压、有功和无功在故障穿越期间的变化基本一致, 有功功率恢复和动态无功支撑能力满足标准要求, 陷波环节几乎不影响风电机组的故障电压穿越性能。

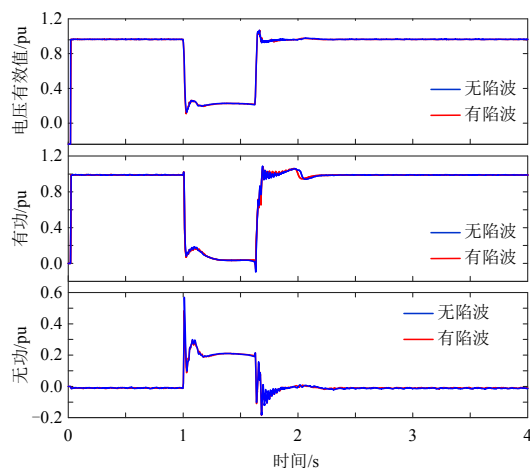


图10 低电压穿越性能对比

Fig. 10 Comparison of low voltage ride through performance

4.2 现场实施与测试过程

在完成振荡特性分析、抑制方法设计和故障电压穿越性能验证后, 在实际系统中部署并测试了次

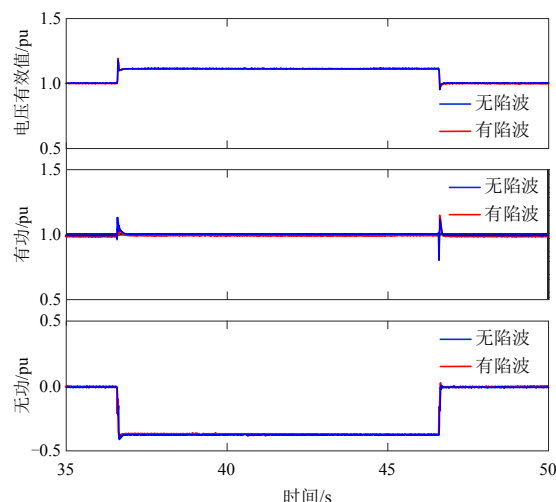


图11 高电压穿越性能对比

Fig. 11 Comparison of high voltage ride through performance

同步陷波策略。首先升级每台变流器的控制程序, 同时预留特征频率和带宽的参数下发接口。程序升级可在风电机组因风速过低停机时进行, 避免额外电量损失。升级完成后, 利用风电场内原有光纤通信网络即可实现陷波环节投切和参数下发。然后改变使能陷波环节的风电机组数量, 收集陷波环节使能后不同工况下的录波数据, 对比评估陷波环节的抑制效果, 最后根据测试结果调整参数设置, 确保抑制措施对实际系统复杂工况的适应性。

4.3 现场试验结果

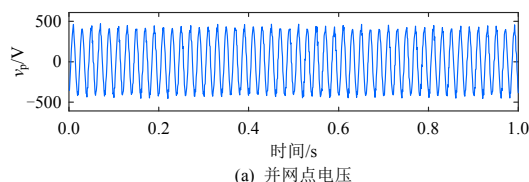
完成风电机组的现场升级后, 进行现场试验。在马头山风电场变电站下发控制参数和使能指令, 依次增加使能陷波环节的机组数量, 获取多工况下的振荡录波数据, 分析振荡抑制效果。

1) 使能陷波环节后机组正常运行。

在使能陷波环节后, 机组将在启动后自动投入陷波环节, 陷波环节投入后机组正常运行, 通过手动触发录波获取了机组变流器在陷波环节投入后的数据。机组并网点电压、电流波形如图12(a)和(b)所示, 图12(c)为电流FFT分析结果, 仅包含工频分量。

2) 使能陷波环节改善机组动态特性。

为避免振荡特性有较大改变, 首先使能单台风电机组的陷波环节。该风电机组并网后正常控制功



(a) 并网点电压

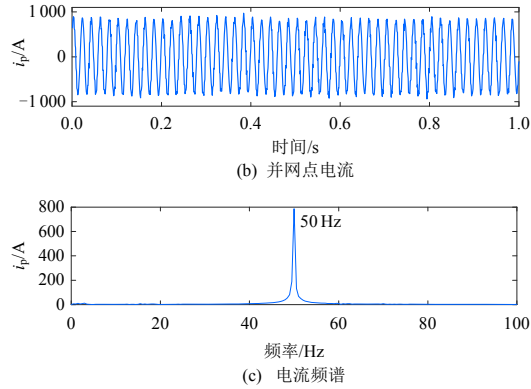


图 12 陷波器投入后双馈风电机组录波

Fig. 12 Record of the DFIG with the filter enabled

能不受影响，捕获到振荡现象后，收集振荡过程中风电机组主控和变流器录波数据进行对比。电磁转矩波形如图 13 所示，最大波动量从近 2 000 N·m 减小为约 100 N·m，削减了约 95%，投入陷波环节后转矩波动显著降低，可以有效避免联轴器打滑等传动系统故障。

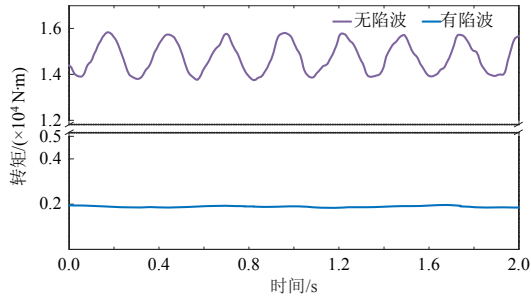


图 13 振荡时转矩对比

Fig. 13 Comparison of the torque during the oscillation

然后对电压、电流滤波后进行频谱分析，得到次同步分量后分别计算投入和未投入陷波环节的风电机组等效阻抗，如表 1 所示。对比 2 台不同风电机组的次同步阻抗，很明显使能陷波环节的风电机组呈现正电阻，未添加陷波环节的机组依然呈现负电阻。由于选取的 2 台机组转速差异不大，可以排除转差率的影响。这一结果和 3 节中的分析一致，次同步陷波环节可以通过减小等效转子电阻来改变机组等效阻抗。其他时刻的次同步阻抗结果也和此次振荡事件一致。

表 1 使能陷波环节后机组等效次同步电阻

Table 1 Equivalent subsynchronous resistance with subsynchronous suppression Filter

风电机组	等效电阻/ Ω
17 号(使能陷波环节)	0.057 2
23 号(不使能陷波环节)	-0.001 2

采用文献[27]中的方法，计算振荡时的次同步

复功率分布，根据发出和吸收次同步有功来判别振荡的源和汇。使能集电线 L6 的风电机组陷波环节后，在小风工况下观察到振荡现象，此时在运的风电机组分别连接到 4 条集电线，次同步复功率计算结果如表 2 所示。可见，其他集电线均为发出振荡有功(有功源)，使能陷波环节的集电线 L6 吸收振荡有功(有功汇)。尽管振荡仍导致部分机组 chopper 保护动作，连接到 L6 线的机组当时均未报告这一故障。

表 2 集电线次同步功率

Table 2 Subsynchronous power flow of collection lines

风电机组	次同步复功率/kVA	源汇分析
L6(使能陷波环节)	0.8-j0.2	有功汇
L1	-0.4+j1.3	有功源
L2	-3.5+j4.8	有功源
L5	-0.4+j1.2	有功源

此外，对振荡时的集电线电流进行 FFT 分析，使能陷波环节的集电线 L6 电流中振荡分量明显降低。图 14 展示了不同时间的振荡事件中 3 组结果，可见使能了陷波环节的 L6 中次同步电流相对基波电流的幅值均低于其他线路。

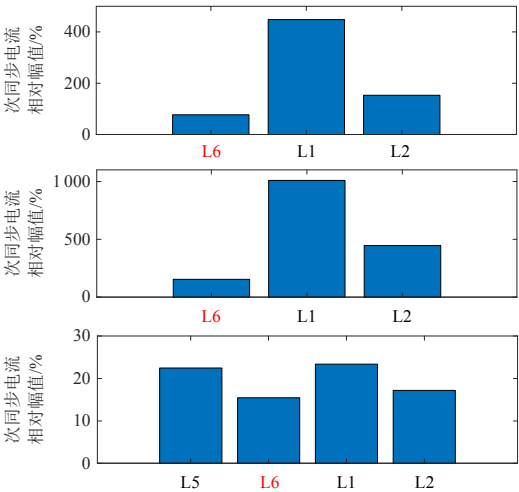


图 14 35 kV 集电线中次同步电流相对幅值

Fig. 14 Relative magnitude of subsynchronous current of 35 kV collection lines

3) 振荡后投入陷波环节实现抑制。

在观察到振荡现象后，手动投入部分风电机组中的次同步陷波环节。傍晚光伏退出后的小风时段，观察到持续的振荡现象，投入同一集电线上在运风电机组的陷波环节，提高了振荡模态阻尼，使得振荡迅速收敛。图 15 展示了集电线中电流随时间变化的 FFT 结果，频谱分析表明，在陷波环节投入后，振荡频率的电流幅值迅速衰减，衰减率达到

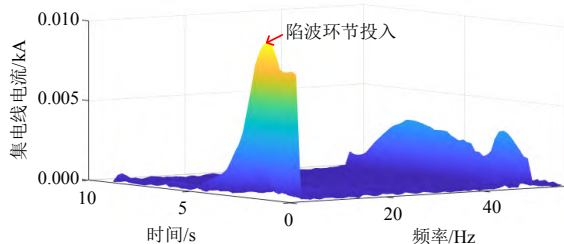


图 15 35 kV 集电线电流的频谱(使能部分陷波环节)

Fig. 15 Spectrum of 35 kV collection line's current (partial suppression filters enabled)

0.85 s^{-1} .

4) 全部机组使能陷波环节。

为确保抑制效果,采用已被证实有效的参数,使能所有风电机组陷波环节。检查使能后的录波数据,在光伏无出力和风电场功率较低的工作下,电压、电流中均无明显次同步振荡分量。如图 16 所示,在光伏退出运行的时间段,风电场功率约为 5 MW 时,集电线路电流中无明显非工频分量。经过多日连续监测,风电场均无振荡现象发生,说明次同步陷波环节有效抑制了振荡。

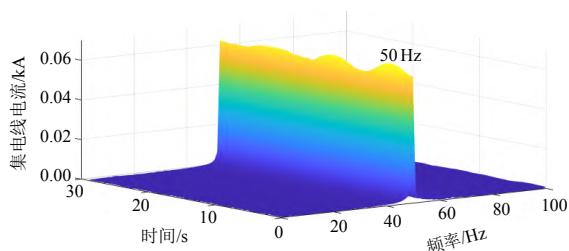


图 16 35 kV 集电线电流的频谱(陷波环节全部使能)

Fig. 16 Spectrum of 35 kV collection line's current (all suppression filters enabled)

5 结论

本文利用现场数据分析了新能源经柔直送出系统的新型振荡现象;提出了“嵌入”次同步陷波环节的抑制方案,并首次开展此类现场抑制试验,主要结论如下:

1) 柔直换流器在较低频率范围内呈正电阻和电容特性,双馈风电机组呈负电阻和电感特性,构成谐振回路,引发不稳定的次同步振荡。

2) 次同步陷波环节能消除双馈风电机组的负电阻,有效抑制振荡。振荡时机组转矩波动减小 95%,同时不影响其正常运行和故障时的动态性能。

3) 现场试验成功证实了抑制方法易于实施,参数设计不依赖模型分析,为解决实际振荡问题提供了一种高效、实用的风电机组侧措施。

后续研究可以结合振荡监测系统,根据振荡频

率在线调整陷波环节参数,进一步增强抑制方法的适应性。

致谢

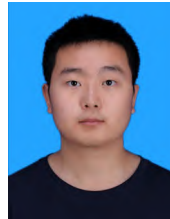
本文现场实施和测试是在浙江日风电气股份有限公司朱凯、江日臻、徐廉云等工程师的大力支持下完成的,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqin. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in Chinese).
- [2] 吕敬,董鹏,施刚,等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
LÜ Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of mmc-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860(in Chinese).
- [3] 黄通,陈新,张东辉,等. 考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网稳定性分析及其阻抗控制优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 8987-8999.
HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. MMC-HVDC integrated system stability analysis and impedance optimization method with consideration of voltage feed-forward control[J]. Proceedings of the CSEE2023, 43(23): 8987-8999 (in Chinese).
- [4] 纪凯,唐广福,庞辉,等. Impedance modeling and analysis of MMC-HVDC for offshore wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1488-1501.
- [5] 孙焜,姚伟,文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6520-6532.
SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6532(in Chinese).
- [6] LYU Jing, CAI Xu, AMIN M, et al. Sub - synchronous

- oscillation mechanism and its suppression in MMC - based HVDC connected wind farms[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 1021-1029.
- [7] ZHANG Yonggang, KLABUNDE C, WOLTER M. Study of resonance issues between DFIG-based offshore wind farm and HVDC transmission[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 190: 106767.
- [8] 邵冰冰, 赵书强, 裴继坤, 等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3344-3352.
- SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, PEI Jikun, et al. Subsynchronous oscillation characteristic analysis of grid-connected DDWFs via VSC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3344-3352(in Chinese).
- [9] 张旭, 谢小荣, 刘辉, 等. 网侧次同步阻尼控制器的设计及其 RTDS 测试[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6503-6510.
- ZHANG Xu, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Design and RTDS test of the grid-side subsynchronous damping controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6503-6510(in Chinese).
- [10] 高本锋, 王飞跃, 于弘洋, 等. 应用静止同步串联补偿器抑制风电次同步振荡的方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1346-1356.
- GAO Benfeng, WANG Feiyue, YU Hongyang, et al. The suppression method of wind power sub-synchronous oscillation using static synchronous series compensator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1346-1356(in Chinese).
- [11] LEON A E, MAURICIO J M. Mitigation of subsynchronous control interactions using multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 420-429.
- [12] CHEN Aikang, XIE Da, ZHANG Daming, et al. PI parameter tuning of converters for sub-synchronous interactions existing in grid-connected DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6345-6355.
- [13] CHOWDHURY M A, SHAFIULLAH G M. SSR mitigation of series-compensated DFIG wind farms by a nonlinear damping controller using partial feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2528-2538.
- [14] WANG Yun, WU Qiuwei, YANG Rong, et al. H^∞ current damping control of DFIG based wind farm for sub-synchronous control interaction mitigation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 509-519.
- [15] 吴熙, 王梦婷, 施星宇, 等. 基于无模型自适应控制的双馈风机次同步振荡附加阻尼控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3601-3613.
- WU Xi, WANG Mengting, SHI Xingyu, et al. SSO supplementary damping control method for DFIG based on model-free adaptive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3601-3613(in Chinese).
- [16] 王杨, 杨汉芦, 肖先勇, 等. 双馈风机附加次同步阻尼控制器抑制方法分析与优化设计[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 184-190.
- WANG Yang, YANG Hanlu, XIAO Xianyong, et al. Mitigation method analysis and optimization design of doubly-fed induction generator additional subsynchronous damping controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 184-190(in Chinese).
- [17] 沈雅琦, 马静, 李鹏冲, 等. 含附加能量支路的虚拟同步双馈风机次同步振荡抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 83-93.
- SHEN Yaqi, MA Jing, LI Pengchong, et al. Subsynchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG-based wind turbines with additional energy branch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 83-93(in Chinese).
- [18] MOHAMMADPOUR H A, SANTI E. SSR damping controller design and optimal placement in rotor-side and grid-side converters of series-compensated DFIG-based wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 388-399.
- [19] HE Hongyan, LV Dianshun, WEN Lu, et al. Analysis and suppression strategies of sub-synchronous resonance on DFIG[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition. Shenzhen: IEEE, 2018: 1-5.
- [20] LIU Huakun, XIE Xiaorong, LI Yu, et al. Mitigation of SSR by embedding subsynchronous notch filters into DFIG converter controllers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(11): 2888-2896.
- [21] SEWDIEN V, WANG Xiongfei, TORRES J R, et al. Critical review of mitigation solutions for SSO in modern transmission grids[J]. Energies, 2020, 13(13): 3449.

- [22] VIETO I, SUN Jian. Sequence impedance modeling and analysis of type-III wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 537-545.
- [23] ZHU Jianhang, HU Jiabing, LIN Lei, et al. High-frequency oscillation mechanism analysis and suppression method of VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8892-8896.
- [24] WANG Liang, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [25] 王渝红, 闵杨晰, 于光远, 等. 基于 Sobol 方法阻抗灵敏度分析的双馈风机系统次同步振荡参数协调优化[J/OL]. 高电压技术, 2022[2023-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220766>.
- WANG Yuhong, MIN Yangxi, YU Guangyuan, et al. Parameters coordinated optimization of subsynchronous oscillation of doubly fed induction generator system based on impedance sensitivity analysis with Sobol method[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022[2023-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220766>(in Chinese).
- [26] 刘卫东. 信号与系统分析基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- LIU Weidong. Fundamentals of signal and system analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008(in Chinese).
- [27] XIE Xiaorong, ZHAN Ying, SHAIR J, et al. Identifying the source of subsynchronous control interaction via wide-area monitoring of sub/super-synchronous power flows[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2177-2185.



李浩志

在线出版日期: 2023-03-17。

收稿日期: 2022-11-02。

作者简介:

李浩志(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统振荡分析与控制, lihz19@mails.tsinghua.edu.cn;

*通信作者: 谢小荣(1975), 男, 教授, 研究方向为电力系统振荡分析与抑制, 柔性输配电系统, xiexr@tsinghua.edu.cn;

刘芮彤(1988), 女, 工学学士, 研究方向为电力系统自动化, 41300743@qq.com;

姜齐荣(1968), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为柔性输配电技术、电能质量分析与控制、新能源发电/分布式发电技术, qrjiang19@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)

Analysis and Mitigation of the Subsynchronous Oscillation in Renewable Energy System Connected to the MMC-HVDC

LI Haozhi¹, XIE Xiaorong^{1*}, LIU Ruitong², JIANG Qirong¹

(1. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University);

2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd.)

KEY WORDS: renewable generation; multilevel converter-based high voltage DC; subsynchronous oscillation

Converter-interfaced generation systems, such as wind and solar, are widely used to produce clean and low-carbon energy. Modular multilevel converter-based high voltage DC (MMC-HVDC) is a promising solution for integrating renewable energy sources. However, the increasing use of power electronics has led to new stability issues, such as wideband electromagnetic oscillation. In Northern China, 2~6 Hz sustained oscillation was observed in a renewable energy system connected to MMC-HVDC during September and October 2022, causing frequent tripping of doubly-fed induction generators (DFIGs) and equipment damage. The oscillation at 4Hz and 96Hz is evident in the field-recorded output current of DFIGs shown in Fig. 1.

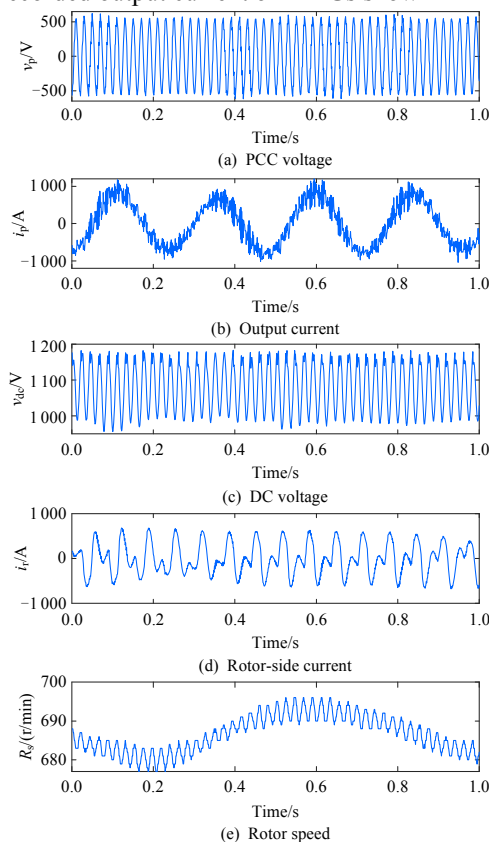


Fig. 1 Fault record of the DFIG

The equivalent impedance network models are established using the field recorded data to explain the cause of the oscillation. Under certain conditions, the

entire system of DFIG-MTDC can be illustrated as the negative-damped RLC series resonant circuit. The MMC-HVDC system may exhibit "virtual capacitance", while the equivalent reactance is provided by the doubly-fed wind farm and the transmission line. At the LC resonant frequency, the slip rate of the DFIG may be negative, which will provide negative damping due to the control-participated induction generator effect.

To mitigate the oscillation, inserting the subsynchronous suppression filter in the DFIG converter control is proposed. The parameter is designed solely using the measured data, then field implementation and tests are conducted. Field test results under different operating conditions validate that the proposed method can effectively mitigate the oscillation without any adverse effect on normal operation and fault ride-through ability. The torque of the DFIGs with and without the filter is compared in the Fig. 2. According to the figure, the torque's oscillation amplitude is clearly reduced. Similarly, the oscillation component in the collection line's current is significantly reduced. In addition, the DFIG's impedances obtained from the measured data are reshaped by the suppression filter to present positive resistance. After all the DFIGs in the wind farm are upgraded with the suppression filter, the oscillation has been eliminated.

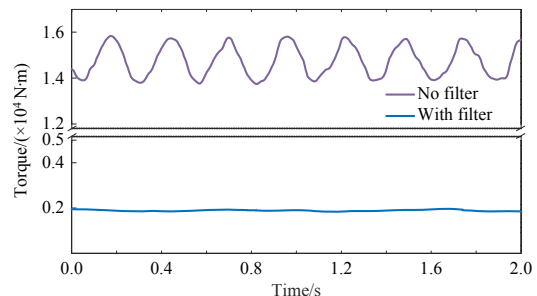


Fig. 2 Comparison of the torque during the oscillation

This is the first implementation of the filtering-based method to mitigate real-world SSO events. The applications in the actual system confirm that the proposed scheme is easy to design and implement, providing an efficient and practical solution for similar issues.