

基于储能附加阻尼控制的风火储系统次同步谐振抑制方法

胡永强¹, 王晰², 吴林林³, 谢小荣², 卜海棠¹, 苏田宇³

(1. 北方多伦新能源有限责任公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 027200; 2. 清华大学(新型电力系统运行与控制全国重点实验室), 北京 100084; 3. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 火电经交流串补线路外送引发的次同步谐振(subsynchronous resonance, SSR)是我国电网建设和运行中的重要问题。文中提出基于储能附加阻尼控制(supplementary damping control, SDC)的振荡抑制方法, 可实现振荡特征量的就地反馈, 并利用机网耦合关系提高整体阻尼。首先, 建立风-火-储-串补外送系统模型, 通过频域-时域联合分析, 阐明火电机组 SSR 的机理与特性; 然后, 设计储能 SDC 策略, 优化选取附加控制增益与延时、添加位置等控制参数, 并分析附加控制所需容量对储能常规功能的影响; 最后, 基于上都电厂风-火-储打捆外送工程, 通过电磁暂态仿真验证所提附加控制策略的有效性与可行性。结果表明, 所提方法能够显著降低 SSR 的控制成本和设备投资成本, 提升振荡抑制的经济性。

关键词: 次同步谐振(SSR); 附加阻尼控制(SDC); 振荡抑制; 电池储能系统(BESS); 风-火-储打捆系统; 串联补偿

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2026)02-0141-09

0 引言

火电机组在串补输电情形下的次同步谐振(subsynchronous resonance, SSR)可造成火电机组轴系疲劳、损伤、断裂与电压电流超限等严重后果, 自上世纪以来长期被学术界和工业界关注^[1-5]。当前, 伴随电力系统“双高”特性凸显, 火电作为保供基石的作用日益显著, 其安全可靠性能愈加关键。同时, 已有的电网拓扑变动和运行方式调整亦会增加潜在的 SSR 风险。以电力电子接口并网的高渗透率新能源装机, 也为火电机组的谐振稳定性赋予了新的不确定因素, 火电、风电、光伏及储能之间的振荡模式耦合风险不容忽视^[6-11]。因而, 对 SSR 抑制的研究具有鲜明的现实意义。

当前抑制火电 SSR 的典型方案包括以下 4 种^[12]: (1) 调整机网参数, 改变等效电路的谐振频率, 增强等效阻尼^[13-14]。(2) 附加励磁阻尼控制(supplementary excitation damping controller, SEDC), 在励磁控制系统的常规调节(如自动稳压、电力系统稳定器)基础上附加能够阻尼谐振的控制环节, 使励磁绕组产生起阻尼作用的次同步频率电压、电流^[15-18]。(3) 加装阻塞滤波(blocking filter, BF), 通过串接多组电感-电容-电阻构成的并联谐振电路, 使系统在互补振荡频率上呈较高的阻抗特性^[19]。(4) 加装机端次同步阻尼控制器(generator terminal subsynchronous damping controller, GTSDC), 通过实

时检测机组扭振信息, 注入频率互补的动态补偿电流, 改变次同步频率特性^[20-22]。

但上述方案在工程实际中仍存在部分不足, 例如 SEDC 为发电机励磁系统引入了新的控制逻辑, 可能带来新旧控制环节交互和协调控制的挑战^[23]; BF 在参数失当的情形下, 可能引发感应发电机效应型的 SSR^[24-25]; GTSDC 需要在机端额外增加数十兆伏安容量的变流器装备, 制造和成本问题不容忽视。因而, 亟须研发能够更加经济、高效地实现火电系统 SSR 抑制的解决方法。

目前, 基于储能的附加阻尼控制(supplementary damping control, SDC)在宽频振荡抑制领域已有研究应用。文献^[26]在储能变流器控制环节中增添有源阻尼控制器, 抑制了直驱风机并网系统的次/超同步振荡模态; 文献^[27]基于混合控制理论设计一种自适应阻尼控制器, 改善储能型虚拟同步发电机的振荡模态与动态响应; 文献^[28]通过电池储能系统(battery energy storage system, BESS)在次同步频段增加双馈风机-串补网络的虚拟阻抗。传统机组方面, 文献^[29]基于压缩空气储能的 SDC, 实现火电低频振荡的高效抑制。随着储能与火电机组结合的不断加深, SDC 有望成为火电 SSR 更理想的应对方案。

文中基于内蒙古上都电厂实际场景, 针对其风-火-储打捆外送系统的潜在 SSR 风险, 设计一种基于储能的 SDC 方法, 可实现就地反馈, 利用机网耦合关系提高整体阻尼, 并提出附加控制参数和储能投入容量的优化方法, 以提升振荡抑制效果。最

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2025-10-24

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51925701)

终,构建目标系统的电磁暂态仿真模型,验证风险运行方式下面向风-火打捆系统的配套储能设施及其SDC技术的有效性。结果表明,所提方案能够显著降低火电SSR的控制成本和设备投资,提升振荡抑制的经济性。

1 风-火-储-串补外送系统及SSR问题

1.1 系统概述与参数

内蒙古上都电厂是我国西电东送北通道的重要支撑点和华北电网的重要电能来源之一。上都电厂的机网特性使其在部分运行方式下具有SSR的潜在风险^[30]。参考上都风-火-储电源打捆经交流串补输电线路外送的工程实例,构建如图1所示的系统模型。区域内拟建设总装机 $S_{WF}=2\,000\text{ MW}$ 的大型风电基地,电厂6台火电机组G1—G6装机容量 $S_{TH}=3\,720\text{ MW}$;为提升新能源利用率,增强风火联合外送的灵活性,目前在风电基地同步建设有300 MW/600 MW·h的储能电站,用于平滑风电出力波动,同时参与调峰、调频、黑启动等辅助服务。风电场和储能电站均经升压先汇集至220 kV母线,再接入区域500 kV汇集站。最终该风-火-储基地输出的电能经3回串补线路外送并网。

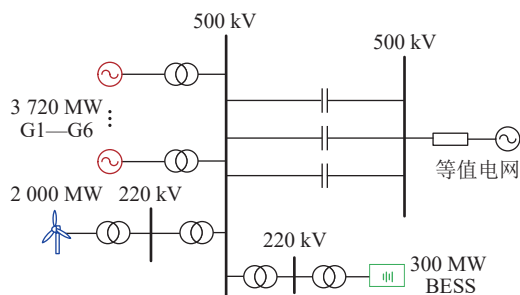


图1 风-火-储打捆经串补外送系统示意

Fig.1 Schematic diagram of wind-thermal-energy storage bundling system connected to the series compensated grid

电源结构的多样性使图1中系统同时面临火电-串补、风电-串补、储能-串补和风电-火电相互耦合带来的宽频振荡风险。因此,须采取适当手段对目标系统的潜在振荡模式和特性开展量化分析。

1.2 SSR特性

上都系统的模型和等值计算参数参考文献^[23]。在运行工作点处对图1中风-火-储打捆系统作线性化处理,分别对系统各组成部分进行阻抗建模,得到如图2(a)所示的等效电路。其中 Z_{TH1} — Z_{TH6} 为6台火电机组等效阻抗; Z_{T1} — Z_{T6} 为6台火电机组所连接变压器的等效阻抗; u_1 — u_6 为6台电压源形式的火电机组; Z_{WF} 、 Z_{T-WF} 、 i_{WF} 分别为风电机组等

效阻抗、风电升压变等效阻抗、风电机组等值的电流源; Z_{ES} 、 Z_{T-ES} 、 u_{ES} 分别为储能电站等效阻抗、储能升压变等效阻抗、储能电站等值的电压源; R_L 、 X_L 、 X_C 、 R_g 、 X_g 分别为线路电阻、线路感抗、线路容抗、电网等值电阻与电网等值电抗。

在火电机组G5、G6的出口进行聚合,如图2(b)所示。 Z_{TH56} 、 Z_{T56} 、 u_{56} 分别为G5、G6两台机组支路聚合得到的机组阻抗、升压变阻抗、等值电源; Z_L 、 Z_g 、 Z_{G-eq} 分别为线路阻抗、电网阻抗、其余所有电源支路的聚合阻抗。

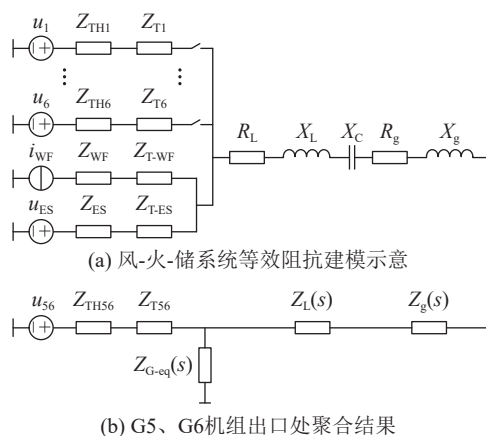


图2 风-火-储打捆经串补外送系统等效电路
Fig.2 Equivalent circuit of wind-thermal-energy storage bundling system connected to the series compensated grid

图2中元件均以等效电阻、电感、电抗的形式呈现。经等效变换处理后,可按照确定低阶电路谐振模式和特征的方法计算该风-火-储打捆系统的谐振频率^[31-32]。相关数据的获取和风-火-储外送系统的阻抗建模均是基于一次扰动源现场测试结果。经求解,该系统在运行机组小于等于4台时存在SSR风险,谐振频率约为27.40~27.60 Hz。这一数值与G5、G6机组的机械扭振频率互补,符合火电-串补SSR的基本特征。

时域电磁暂态仿真亦能印证这一理论结果,在PSCAD/EMTDC软件中依据上都电厂现有设备与参数构建仿真模型。结果显示,在含G5、G6机组参与的2种不同机组投运方式下,G5机组的模式转速变化曲线如图3所示。电厂前期已在部分发电机端部署了GTSDC,但图3结果表明,GTSDC并未起到彻底的SSR抑制作用。

G6机组模式转速波形与图3中G5机组模式与转速波形相似,均呈发散态势,文中鉴于篇幅原因不再逐一列出。

仿真亦对振荡发生后系统内次同步电流的分布与流向进行了分析,结果表明G5、G6两台机组

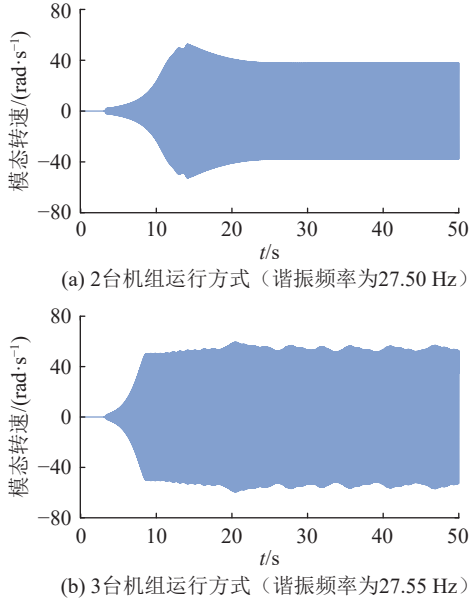


图3 火电机组在线的机组模态转速

Fig.3 The modal speed of online thermal generator

呈现次同步功率源的特性, 向系统输出振荡电流, 而其余机组、风场、储能电站均被动参与谐振, 吸收次同步功率。

2 储能 SDC 的设计与分析

2.1 设计原理

BESS 主要由电池组、直流/直流变换器 (direct current to direct current converter, DC/DC) 与储能变流器 (power conversion system, PCS) 三部分组成。DC/DC 的拓扑为双向 Buck-Boost 电路, 采用恒定直流电压或恒定直流功率控制; PCS 实现电池直流电能和网侧交流电能的双向变换。

SDC 通过改良 PCS 的控制环实现。SDC 的基本流程为: 通过对与振荡模态强相关的状态变量进行实时监测与辨识, 获知其中蕴含的振荡模态; 之后由滤波环节提取出待抑制的振荡频率分量, 再经比例移相与幅值调制生成次同步参考信号; 该参考信号与 PCS 控制环原先的输出相叠加作为 d 、 q 轴参考电压, 注入 BESS 并网系统。

SDC 实现振荡抑制的核心在于调整储能变流器的电压、电流输出, 提升 PCS 对振荡模式的阻尼。SDC 实现振荡抑制的机理如图 4 所示, 图 4 中 $Z_{TH-WF-ES}(s)$ 为系统源侧的等效阻抗, 即所有火电支路、风电支路和储能支路的并联阻抗; $I_{out}(s)$ 为附加控制所提供的输出电流; $U(s)$ 、 $I(s)$ 分别为原有系统公共连接点处的电压、电流。从频域分析角度, SDC 的存在为风-火-储打捆外送系统的阻抗模型添加了一条可设计调节的并联支路, 为重塑电源侧阻抗特性从而解决谐振问题提供了可行性。

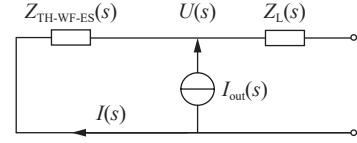


图4 SDC 实现振荡抑制的机理示意

Fig.4 Schematic diagram of mechanism on oscillation mitigation via SDC

根据图 4 可推导得到投运 SDC 后风-火-储打捆外送系统的聚合阻抗为:

$$Z(s) = \frac{Z_{TH-WF-ES}(s)}{1 + H_i(s) + H_u(s)Z_{TH-WF-ES}(s)} + Z_L(s) \quad (1)$$

式中: $H_i(s)$ 、 $H_u(s)$ 分别为 SDC 对电流和电压反馈信号的传递函数。

对于运行方式中存在谐振风险的风-火打捆系统, 其原本的阻抗模型 $Z_{TH-WF-ES}(s) + Z_L(s)$ 必然存在实部位于右半平面的极点。通过 SDC 引入的传递函数项 $H_i(s)$ 和 (或) $H_u(s)$ 的调节, 则有望改善 $Z(s)$ 特性, 使之具备充分稳定的振荡模态。

2.2 附加位置与控制参数优化

对于 SDC 在控制环中的添加位置, 文献[33]以双馈风电机组源、网两侧的变流器为研究对象, 比较了在不同控制环节添加陷波阻尼控制器后的综合效果。经过工程情景的理论、仿真分析和不同位置阻尼性能的比较, 选取储能系统变流器电流内环作为附加阻尼信号的输入位置, 并网电流偏差量作为反馈信号, 控制结构见图 5, 其中 P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为储能有功功率、无功功率参考值; P 、 Q 分别为储能有功功率、无功功率实际值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为外环输出直、交轴电流参考值; i_d 、 i_q 分别为外环输出直、交轴电流实际值; u_{dref} 、 u_{qref} 分别为内环输出直、交轴电压参考值; u_d 、 u_q 分别为内环输出直、交轴电压实际值; ω_0 为工频对应的角频率; L_s 为连接电感; $H_F(s)$ 为滤波环节; $G_{add}(s)$ 为比例移相环节; PI_1 — PI_4 为比例积分 (proportional integral, PI) 环节。

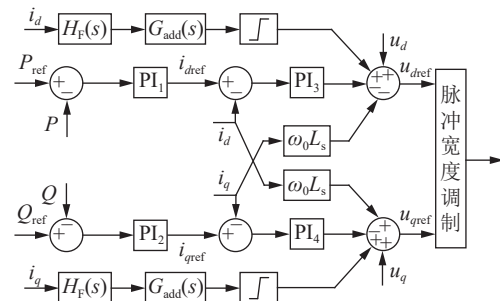


图5 SDC 策略结构

Fig.5 Structure of SDC strategy

SDC 通道由滤波环节 $H_F(s)$ 、比例移相环节 $G_{add}(s)$ 与限幅环节组成。

(1) 滤波环节 $H_F(s)$ 。

根据待抑制的振荡模态, SDC 的滤波环节可选择不同形式, 如低通滤波器、高频滤波器、带通滤波器等。滤波形式选择的关键是去除“背景”信号, 即工频分量的影响。因此, 将滤波环节 $H_F(s)$ 设计为低通滤波(low pass filter, LPF)、高通滤波(high pass filter, HPF)、带通滤波(band pass filter, BPF)与窄带型带阻滤波(band reject filter, BRF)复合串联的形式, 见图 6。其中 $\omega_1 \sim \omega_4$ 、 $\zeta_1 \sim \zeta_4$ 分别为 4 组滤波器的中心频率与阻尼系数。LPF 与 HPF 首先滤除高频、低频分量与噪声, BPF 提取目标振荡模式, 而 BRF 针对工频分量具有较强的衰减功能。

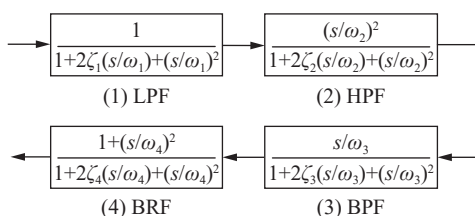


图 6 SDC 采用的滤波环节
Fig.6 Filter design in SDC

参数方面, 滤波器的带宽主要取决于阻尼系数 ζ 。对于 BRF, 由于工频变化的范围非常小, 因此带宽可以设置的稍窄, 如 2~3 Hz; 而 BPF 需考虑潜在的振荡频率变化范围, 使带宽可以覆盖所关注的风险频段。某些情形下, 滤波器组还应具备自适应频率变化的功能, 准确测量与辨识振荡特征参数。

(2) 比例移相环节 $G_{add}(s)$ 。

比例移相环节调整和处理滤波产生的次同步分量, 产生幅值、相位匹配的反馈参考信号, 从而能够与原信号中所含的振荡分量抵消, 起到抑制效果。 $G_{add}(s)$ 的传递函数可表示为:

$$G_{add}(s) = K_g \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^m \quad (2)$$

式中: K_g 、 m 、 T_1 、 T_2 分别为比例移相增益、比例移相阶数、超前时间常数、滞后时间常数。其最优值可通过求解最大化振荡衰减率的约束优化问题得到:

$$\begin{cases} \max(\min \xi) \\ \text{s.t. } \xi > 0 \\ n \leq N \quad n \in \mathbf{N}^+ \\ \underline{\omega} \leq \omega_i \leq \bar{\omega} \\ |K_g| \leq \bar{K} \\ 0 \leq T_1 \leq \bar{T} \\ 0 \leq T_2 \leq \bar{T} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ξ 为衰减率, 通过式(4)计算得到; n 、 N 分别为火电机组投运台数和总台数; ω_i 为第 i 台机组的机组转速; $\bar{\omega}$ 、 $\underline{\omega}$ 分别为机组转速的上、下界; $\bar{K}$ 为控制

增益的上界; $\bar{T}$ 为时间常数的上界。

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (4)$$

式中: σ 、 ω 分别为系统聚合阻抗模型极点的实部与虚部。不同工况下系统的谐振模态不尽相同, 因此优化目标设定为最大化最恶劣情形, 即在线机组数量少、输电线路投运回数少、并网风电出力小(具体见 3.1 节)下的振荡抑制效果, 从而使 SDC 始终能够提供符合稳定控制预期的等效正阻尼^[34]。

采用遗传-模拟退火(generation simulated anneal, GASA)算法求解式(3)。GASA 作为一种启发式算法, 将遗传算法的并行搜索结构与模拟退火算法的概率突跳性结合, 可以较好地解决此类控制参数的优化问题^[16]。按 GASA 算法得到各控制参数取值, 如表 1 所示。

表 1 SDC 参数
Table 1 Parameters of SDC

参数	数值
d 轴外环PI系数 K_{p1} 、 K_{i1}	5、0.01
q 轴外环PI系数 K_{p2} 、 K_{i2}	1、0.1
d 轴内环PI系数 K_{p3} 、 K_{i3}	0.2、0.01
q 轴内环PI系数 K_{p4} 、 K_{i4}	0.5、0.01
LPF中心频率 f_1/Hz	10
HPF中心频率 f_2/Hz	40
BPF中心频率 f_3/Hz	27.6
BRF中心频率 f_4/Hz	16.4/31
LPF阻尼系数 ζ_1	0.5
HPF阻尼系数 ζ_2	0.5
BPF阻尼系数 ζ_3	0.054 3
BRF阻尼系数 ζ_4	0.063 6/0.032 3
比例移相增益 K_g	8
比例移相时间常数 T_1 、 T_2/s	-3×10^{-4} 、 3×10^{-4}

2.3 阻尼控制的容量需求与功能分析

SDC 所附加的变流器容量(可视为储能容量)将影响阻尼控制回路增益的大小, 进而影响控制器等效阻抗支路的幅值及控制效果^[35]。

以图 2 等效电路中聚合阻抗的极点作为量化分析指标, 改变 SDC 对应等效阻抗的幅值与相角参数, 得到闭环系统极点实部(振荡阻尼)与虚部(振荡频率)的变化曲线, 如图 7 所示。

可见, 较小的阻抗幅值对应更大的控制增益和容量, 可使特征值实部离虚轴更远, 但亦会引起较大的虚部偏移, 即振荡频率的较大改变, 导致原始参数偏离设计目标。而当阻抗幅值较大, 增益和容量偏小时, 可能出现无法改善特征值实部, 系统依

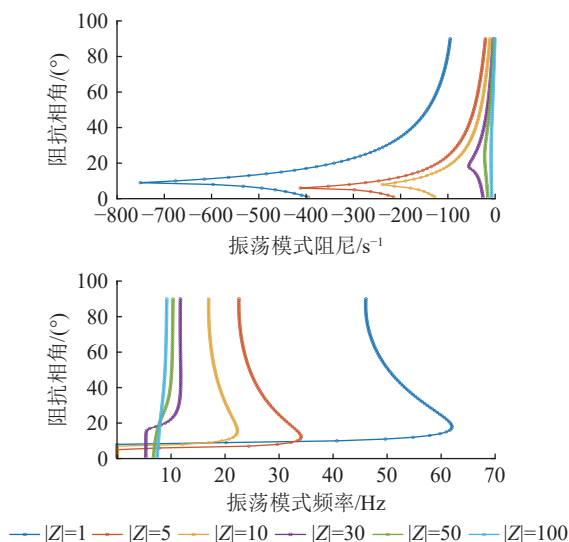


图7 采取附加控制后等效电路的特征值变化

Fig.7 Eigenvalue changes of the equivalent circuit after using supplementary control

然处于负阻尼或弱阻尼的情形。因此阻尼控制占用的容量须结合系统实况和理论分析结果,灵活设置在合理范围。

储能系统除提供阻尼控制容量外,还须执行削峰填谷、频率调节等电网调度指令。通常,储能的常规调节功能主要针对工频分量和较长时间尺度内的电力电量平衡、有功-频率稳定等。而旨在抑制谐振的SDC响应的频率范围大致在目标模式频率的 ± 3 Hz之间;且经过多级窄带滤波后产生的电流或电压参考信号均位于次/超同步频段,不会对50 Hz的储能内环输出信号产生较为显著的影响。

3 仿真结果分析

3.1 风险方式选取

结合图1系统拓扑与上都电厂SSR的实际情形,从以下角度构建潜在的运行方式集。

(1) 电网拓扑: 电网较弱(火电机组减少)或串补度较高(线路减少)会导致更严重的振荡风险。仿真考虑故障后仅1回输电线路投运时的振荡抑制效果。

(2) 火电机组投运组合: 前期运行经验反映,当火电机组投运数量在3台及以下时,系统易在扰动或故障作用下出现发散型振荡。因此主要关注两机并网,且出力水平较低的运行方式。

(3) 风电接入容量: 根据上都系统运行实际,风电接入容量的增加在当前装机规模下对火电SSR起到一定的抑制作用,因此仿真中重点关注无风机并网的情形,同时亦展示不同风电出力水平下的SSR治理效果。

(4) 储能工作状态: 按风电接入容量的选取逻辑,仿真中关注BESS作为电力负荷充电的情景。

3.2 仿真结果

引发振荡的扰动方式为: 仿真初始状态下,各类型电源经变换升压后通过两回线路L1、L2外送;3 s时,线路L1首端发生三相接地故障;3.1 s保护动作,切除L1。G5、G6两台机组并网发电,以20%左右的出力深度调峰运行;BESS以额定功率300 MW进行充电,初始荷电状态为50%。

为应对火电机组SSR风险可能带来的损失,电厂前期已在部分发电机端部署了GTSDC。但对文中所关注的风-火-储系统相互耦合造成的SSR问题,单纯依靠GTSDC并不能很好地起到稳定控制的作用。图8展示了仅投运现有GTSDC后的振荡波形,可见模态转速呈现发散后持续等幅振荡的趋势。

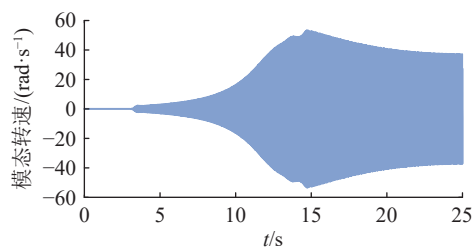


图8 仅投入GTSDC时的G5振荡模态转速

Fig.8 Oscillation mode speed of G5 when only GTSDC in service

储能变流器未采用SDC环节时,故障前后的转速波形如图9(a)。而在储能PCS的控制环增加SDC环节后,转速波形如图9(b)所示。火电机组的振荡模态转速在严重的三相故障工况下仍可以实现良好的收敛,SSR得到显著抑制。

SDC投入后,BESS的并网电压、有功功率、无功功率等指标变化见图10。可见,基于储能装置的SDC基本只作用在振荡发生后的短时间(10~20 s)内;且由于多级窄带滤波与限幅环节的存在,BESS的工频输出量和常规的电压调节、频率调节、削峰填谷等功能不会受到不利影响。这一效果也为SDC的实际应用提供了较强的工程可行性:在邻近火电或新能源场站的储能电站中,仅需要对承担振荡抑制功能的临界容量储能单元进行模块化软件修改,而不必升级更换全部的变流器控制系统,从而避免繁杂庞大的现场工作量。

此外,考虑风电出力对SDC抑制SSR效果的影响,不同风速水平下发电机的振荡模态转速比较见图11。结果表明,采用储能SDC后,系统对较大范围风电出力波动下的振荡风险均具有抑制能力,体现了SDC策略较强的自适应能力与鲁棒性。

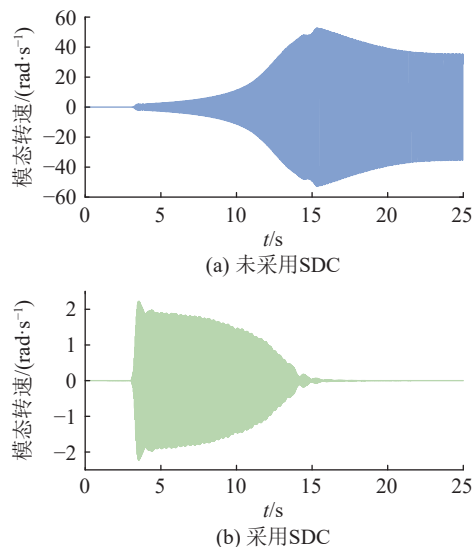


图9 BESS投运后的G5振荡模态转速
Fig.9 Oscillation mode speed of G5 after BESS is in service

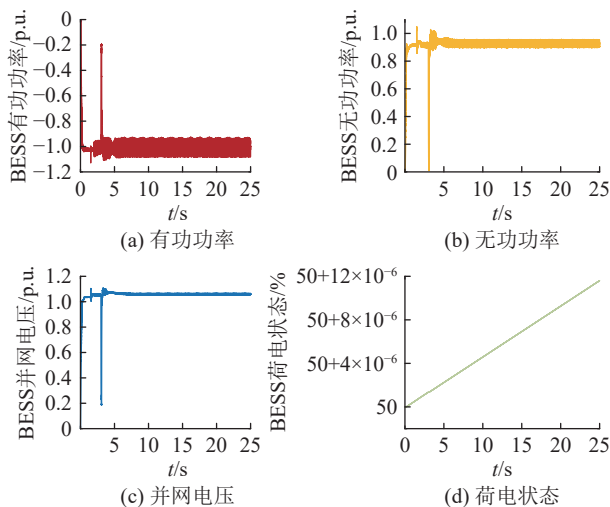


图10 SDC作用时BESS的输出曲线
Fig.10 Output of BESS with SDC in service

从投资经济性角度分析,GTSDC属于一次设备,需要具有一定容量规模的电力电子装置作为设施基础,整体投资为60~80万元/(MV·A),同时日常运行时有0.6%~1.0%的损耗^[36]。而采用储能SDC的方案仅须改造控制软件,几乎没有硬件支出,可以节省大量设备投资和控制运维成本。

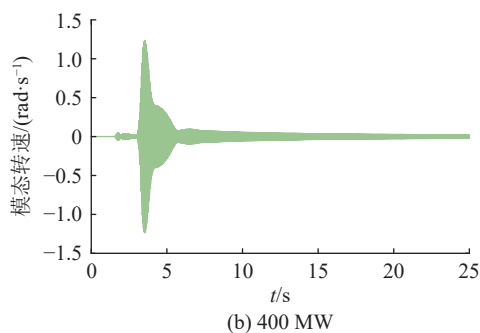
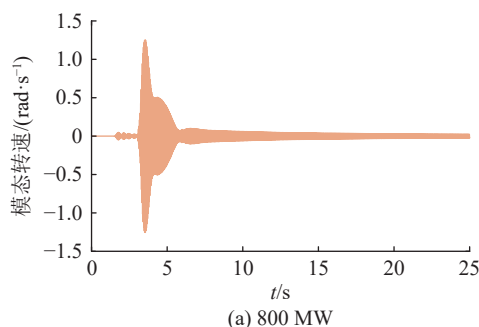


图11 不同风电出力水平下的G5振荡模态转速
Fig.11 Oscillation mode speed of G5 under different wind power output levels

4 结论

文中提出基于储能SDC的风-火-储打捆系统SSR抑制方法,并经过不同配置下的仿真结果对比,给出了技术经济性较为理想的火电机组SSR治理方案,可为工程实践提供参考。主要结论如下:

- (1) 储能SDC能够改善原有风-火-储打捆外送系统的阻抗特性,利用机网耦合关系提高等效阻尼,从机理上抑制振荡的持续发散。
- (2) SDC的添加位置、控制参数、容量需求等可通过优化求解与仿真比较等手段联合获取,以提高振荡抑制效果。
- (3) 储能SDC技术能够在降低SSR的控制成本和设备投资成本的同时,确保储能可靠执行各项常规调节功能,提升振荡抑制的经济性。

致谢

本文得到华北电力科学研究院有限责任公司科技项目(KJJ2022091)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Reader's guide to subsynchronous resonance[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1992, 7(1): 150-157.
- [2] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Countermeasures to subsynchronous resonance problems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1980, 99(5): 168-175.
- [3] 臧德春, 赵荣臻, 杨超, 等. 火电机组交互影响对次同步振荡的作用机理研究[J]. *浙江电力*, 2024, 43(2): 25-33.
ZANG Dechun, ZHAO Rongzhen, YANG Chao, et al. Study on the mechanism of interaction between thermal power units on subsynchronous oscillation[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(2): 25-33.
- [4] 郭成, 杨宣铭, 杨灵睿, 等. 基于改进SOBI-SGMD算法的次同步振荡模态辨识研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(14): 100-110.
GUO Cheng, YANG Xuanming, YANG Lingrui, et al. Research on subsynchronous oscillation mode identification based on

- improved SOBI-SGMD algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(14): 100-110.
- [5] 赵牧驰, 汪海蛟, 刘纯, 等. 汽轮机发电机组宽频带阻抗建模及次/超同步振荡分析[J]. *中国电力*, 2024, 57(7): 238-246.
ZHAO Muchi, WANG Haijiao, LIU Chun, et al. Broadband impedance modeling and sub/super-synchronous oscillation analysis of steam turbine generator[J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 238-246.
- [6] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [7] 高本锋, 刘培鑫, 刘王锋, 等. 直驱风电场并网对火电机组次同步谐振影响[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(11): 3308-3322.
GAO Benfeng, LIU Peixin, LIU Wangfeng, et al. Influence of grid connected DirectDrive wind farm on subsynchronous resonance of thermal power units[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(11): 3308-3322.
- [8] 赵斌, 杨俊丰, 庞建霞, 等. 考虑混合储能主动参与风光储电站的功率分配与调频策略[J]. *电力建设*, 2024, 45(7): 144-155.
ZHAO Yi, YANG Junfeng, PANG Jianxia, et al. Power-distribution and frequency-regulation strategies for wind-solar power stations actively supported by hybrid-energy storage[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(7): 144-155.
- [9] 马杰, 于振博, 郝元钊, 等. 考虑动态频率响应的火电-储能调频优化控制[J]. *浙江电力*, 2025, 44(3): 10-21.
MA Jie, YU Zhenbo, HAO Yuanzhao, et al. Optimal control of frequency modulation for thermal power and energy storage considering dynamic frequency response[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2025, 44(3): 10-21.
- [10] 黄怡涵, 王小海, 张红光, 等. 火电机组一次调频简化模型改进与电力系统频率安全约束解析计算[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(15): 36-47.
HUANG Yihan, WANG Xiaohai, ZHANG Hongguang, et al. Improvement of simplified primary frequency regulation model for thermal power units and analytical calculation of power system frequency security constraints[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(15): 36-47.
- [11] 赵鹏, 黄云辉, 王栋, 等. 基于有源阻尼控制的区域电网新能源基地次同步振荡抑制的研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(4): 85-90, 115.
ZHAO Peng, HUANG Yunhui, WANG Dong, et al. Subsynchronous oscillation suppression of new energy base in regional power grid based on active damping control[J]. *Smart Power*, 2024, 52(4): 85-90, 115.
- [12] 谢小荣, 李浩志. 电力系统振荡研究进展[J]. *科学通报*, 2020, 65(12): 1119-1129.
XIE Xiaorong, LI Haozhi. Advances on power system oscillation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(12): 1119-1129.
- [13] 唐欣, 王帅, 李珍, 等. 基于虚拟电阻的独立直流微电网有源阻尼控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2025, 40(3): 192-199, 210.
TANG Xin, WANG Shuai, LI Zhen, et al. Active damping control based on virtual resistance for stand-alone DC micro-grid[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2025, 40(3): 192-199, 210.
- [14] 李长宇, 刘博昊, 肖仕武, 等. 基于功率外环附加阻尼控制的柔性直流抑制送端火电机组次同步振荡研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(2): 20-27, 73.
LI Changyu, LIU Bohao, XIAO Shiwu, et al. Research on subsynchronous oscillation suppression strategy of flexible HVDC with thermal power units based on external loop damping control[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 20-27, 73.
- [15] 孙彦龙, 班连庚, 宋瑞华, 等. 采用 STATCOM 与 SEDC 的多机系统次同步谐振抑制措施[J]. *电网技术*, 2013, 37(5): 1341-1345.
SUN Yanlong, BAN Liangeng, SONG Ruihua, et al. Study on damping scheme of subsynchronous resonance in a multi-machine system by combination of SEDC with STATCOM[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(5): 1341-1345.
- [16] 徐振宇, 李树鹏, 苏靖棋, 等. 基于遗传模拟退火算法的 SEDC 与 SSDC 控制参数的协调优化[J]. *电网技术*, 2015, 39(7): 1983-1988.
XU Zhenyu, LI Shupeng, SU Jingqi, et al. Genetic and simulated annealing algorithm based coordinated optimization of parameters of supplementary excitation damping controller with parameters of sub-synchronous oscillation damping controller[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(7): 1983-1988.
- [17] 吴熙, 蒋平. 基于实用稳定域的次同步振荡阻尼控制器设计[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(25): 123-129, 19.
WU Xi, JIANG Ping. Subsynchronous damping controller design based on practical stability region[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(25): 123-129, 19.
- [18] 马燕峰, 王翌静, 王慧, 等. 基于阻尼特性的低频和次同步振荡统一抑制[J]. *可再生能源*, 2025, 43(10): 1368-1375.
MA Yanfeng, WANG Yijing, WANG Hui, et al. Unified suppression of low-frequency and subsynchronous oscillations based on damping characteristics[J]. *Renewable Energy Resources*, 2025, 43(10): 1368-1375.
- [19] XIE X R, LIU P, BAI K, et al. Applying improved blocking filters to the SSR problem of the Tuoketuo power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(1): 227-235.
- [20] DONG X L, XIE X R, HAN Y D, et al. Coordinated parameters design of SEDC and GTSDC for SSR mitigation[C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA. IEEE, 2014: 1-5.
- [21] XIE X R, WANG L, HAN Y D. Combined application of SEDC and GTSDC for SSR mitigation and its field tests[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(1): 769-776.
- [22] MAN J, LI Y, CHANG F, et al. Variable-gain GTSDC to miti-

- gate SSR in turbine generators connected to series-compensated power systems[C]//The 10th Renewable Power Generation Conference (RPG 2021). Online Conference. London: IET, 2021: 747-753.
- [23] 谢小荣, 韩英铎, 郭锡玖. 电力系统次同步谐振的分析与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 7-11.
XIE Xiaorong, HAN Yingduo, GUO Xijiu. Analysis and control of subsynchronous resonance in power system[M]. Beijing: Science Press, 2015: 7-11.
- [24] CEN H F, WANG X T. Analysis of self-excitation in turbine-generators induced by static blocking filter[C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China. IEEE, 2010: 1-5.
- [25] XU J Y, XIE X R, SHAIR J, et al. Unstable subsynchronous interaction induced by blocking filters in a wind-thermal combined power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(6): 5535-5545.
- [26] 莫必祥, 伍文华, 陈燕东, 等. 抑制直驱风电并网系统次/超同步振荡的储能变流器有源阻尼控制方法[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2380-2391.
MO Bixiang, WU Wenhua, CHEN Yandong, et al. Active damping control for power conversion system to suppress sub-/super-synchronous oscillation of D-PMSG grid-connected system[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2380-2391.
- [27] 金铭鑫, 王彤, 黄世楼, 等. 含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 170-177, 191.
JIN Mingxin, WANG Tong, HUANG Shilou, et al. Adaptive coordinated damping control strategy for grid-connected direct-driven wind turbine system with energy storage-based virtual synchronous generators[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 170-177, 191.
- [28] SALEHI F, GOLSHANI A, MATSUO I B M, et al. On mitigation of sub-synchronous control interactions in hybrid generation resources[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(7): 4372-4382.
- [29] 汪康康, 孙昕炜, 周波, 等. 基于压缩空气储能附加阻尼控制的电力系统低频振荡抑制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(10): 115-123.
WANG Kangkang, SUN Xinwei, ZHOU Bo, et al. Low-frequency oscillation suppression strategy for power system based on supplementary damping control of compressed air energy storage[J]. *Electric Power*, 2023, 56(10): 115-123.
- [30] 谢小荣, 郭锡玖, 吴景龙, 等. 上都电厂串补输电系统附加励磁阻尼控制抑制次同步谐振的现场试验[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 27-32.
XIE Xiaorong, GUO Xijiu, WU Jinglong, et al. Field tests of SEDC for damping subsynchronous resonance in Shangdu series-compensated transmission system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(1): 27-32.
- [31] 高本锋, 符章棋, 王刚, 等. 适用于次同步振荡分析的直驱风电场平衡降阶方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 112-120.
GAO Benfeng, FU Zhangqi, WANG Gang, et al. Balanced reduction method of direct-drive wind farm for subsynchronous oscillation analysis[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(3): 112-120.
- [32] 王利超, 于永军, 张明远, 等. 直驱风电机组阻抗建模及次同步振荡影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 170-177.
WANG Lichao, YU Yongjun, ZHANG Mingyuan, et al. Impedance model and analysis of subsynchronous oscillation influence factors for grid-connected full-converter wind turbines[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(1): 170-177.
- [33] LIU H K, XIE X R, LI Y, et al. Mitigation of SSR by embedding subsynchronous Notch filters into DFIG converter controllers[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(11): 2888-2896.
- [34] 伍双喜, 王晰, 刘洋, 等. 基于构网型储能的风电场-弱电网次同步振荡抑制方法[J/OL]. 电力建设, 2024: 1-10. (2023-12-28)[2025-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.TM.20231227.626.002.html>.
WU Shuangxi, WANG Xi, LIU Yang, et al. Subsynchronous damping control of grid-forming BESS in wind farms connected to a weak AC grid[J/OL]. *Electric Power Construction*, 2024: 1-10. (2023-12-28)[2025-05-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.TM.20231227.1626.002.html>.
- [35] 赵伟, 李浩志, 李付强, 等. 抑制双馈风电场次同步振荡的自适应阻尼控制器设计及硬件在环试验[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4065-4073.
ZHAO Wei, LI Haozhi, LI Fuqiang, et al. Adaptive damping controller designing and HIL testing for mitigating SSO in DFIG-based wind farm[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(10): 4065-4073.
- [36] 谢小荣, 郭锡玖, 吴景龙, 等. 基于电力电子变流器的机端次同步阻尼控制器研究与测试[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 666-671.
XIE Xiaorong, GUO Xijiu, WU Jinglong, et al. Research and test of a generator terminal subsynchronous damping controller based on power electronic converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(4): 666-671.

作者简介:



胡永强

胡永强(1974), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统风险评估和运行控制工作(E-mail: 1095225080@qq.com);

王晰(2001), 男, 博士在读, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制;

吴林林(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 从事新能源调度运行与并网稳定技术工作。

Mitigating subsynchronous resonance using supplementary damping control of battery energy storage in a wind-thermal-storage bundling system

HU Yongqiang¹, WANG Xi², WU Linlin³, XIE Xiaorong², BU Haitang¹, SU Tianyu³

(1. Beifang Duolun Renewable Energy Co., Ltd., Xilingol League 027200, China; 2. Tsinghua University (State Key Laboratory of Power System Operation and Control), Beijing 100084, China; 3. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Subsynchronous resonance (SSR) caused by the interaction between thermal power generators and series-capacitor-compensated AC lines, has been a significant concern in China's power grids. An energy storage supplementary damping control (SDC) to suppress SSR is proposed in this paper. SDC enables local feedback, and utilizes the coupling between generators and power grid to enhance the overall damping level. Firstly, the target system is modelled and the mechanism and characteristics of its SSR problem are clarified through frequency and time-domain analyses. Then, the supplementary damping control strategy is established based on battery energy storage system (BESS). Its control parameters and adding positions are optimized, and the impact of SDC's control capacity on BESS's normal functions is analyzed. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed SDC are verified through electromagnetic transient simulations with a real-world project, i.e., the Shangdu wind-thermal-energy storage bundling system. The simulation results also show that the proposed SDC can effectively address the SSR issue with reduced control cost and equipment investment cost, serving as a more economical solution.

Keywords: subsynchronous resonance (SSR); supplementary damping control (SDC); resonance mitigation; battery energy storage system (BESS); wind-thermal-storage bundling system; series compensation

(编辑 陈雯嘉)

(上接第 120 页)

BiGRU-PLE based short-term joint forecasting of electric, cooling and heat loads

XU Yihao, MEI Fei, LU Jiahua

(School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Accurate forecasting of electric, cooling and heating loads is an important prerequisite and foundation for the operation scheduling and energy management of integrated energy systems. Leveraging the energy coupling characteristics between multivariate load, this paper constructs a joint prediction model for multivariate load based on bidirectional gated recurrent units (BiGRU) and a progressive layered extraction (PLE) network architecture. Firstly, the meteorological features with high correlation are screened as input features of the model through the maximum information coefficient. Then, the BiGRU network is used to extract the temporal features of the multivariate load time series under the integrated energy system and reconstruct the data in this way. Secondly, for the characteristics of different energy sources that are coupled with each other, the improved progressive hierarchical extraction network structure is proposed, and the coupling features are extracted from the complex and multidimensional data through the multilevel sharing of the feature extraction layer. Finally, by changing the structural parameters of the sub-task tower module, the coupled feature information is differentially fused, and the multiple load prediction results are obtained. The actual example results show that the maximum information coefficient screening method adopted in the article is more suitable for feature selection of meteorological data than the traditional Pearson coefficient screening method, and the proposed BiGRU-PLE multivariate load prediction model can reduce the prediction error by more than 5% compared with the single-task model, and by more than 3% compared with the common multitask model.

Keywords: bidirectional gated recurrent unit (BiGRU); maximum information coefficient; coupled feature extraction; multivariate load forecasting; integrated energy system; multitask learning

(编辑 陆海霞)