

新能源发电基地宽频带振荡问题 分析及抑制

王伟胜 主任, 教授级高工, CSEE会士

中国电力科学研究院新能源研究中心

(新能源与储能运行控制国家重点实验室)

2021年中国电机工程学会年会院士专家论坛

2021年12月15日 北京



主要内容

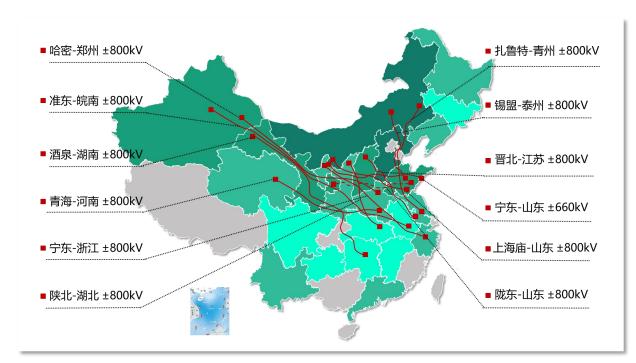
- 一、问题的提出
- 二、新能源并网宽频带振荡机理
- 三、新能源并网宽频带振荡分析方法
- 四、新能源并网宽频带振荡抑制技术
- 五、实证试验与工程应用
- 六、总结与展望



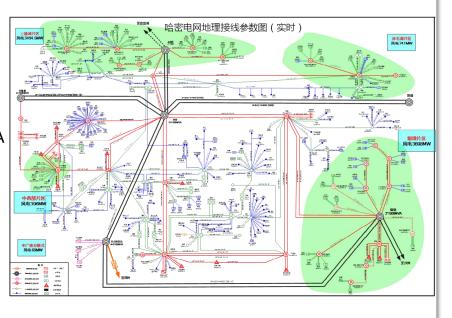
中国电力科学研究院有限公司 CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

一、问题的提出

我国风、光资源主要集中于"三北"地区,资源与负荷的逆向分布决定了大规模集中开发、远距离送出是我国新能源大规模开发利用的主导形式之一。"三北"新能源基地呈现高比例新能源、高比例电力电子装备的"双高"特征,系统同步特性弱化,稳定特性与传统电力系统相比发生深刻变化。



- 风电 > 10GW
- 光伏 > 2GW
- 无功补偿 > 2GVA
- 哈郑直流: ±800kV/8GW
- 火电: 5GW



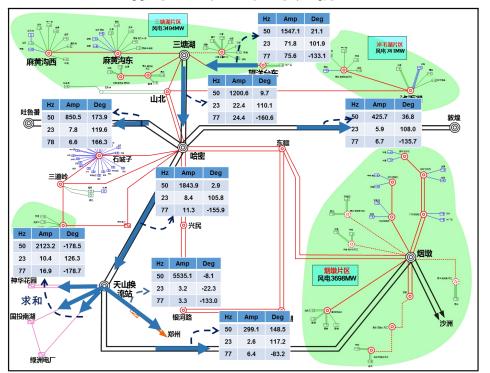


中国电力科学研究院有限公司 CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE



2009年起,国内外新能源发电并网系统频繁发生次同步到数百Hz频率范围内的宽频带振荡问题。 近两年投运的国内多个新能源基地经交/直流送出系统均面临突出的宽频带振荡风险,成为制约新能 源送出和消纳的重要因素之一。

哈密振荡分量分布分析



国内外新能源并网振荡案例

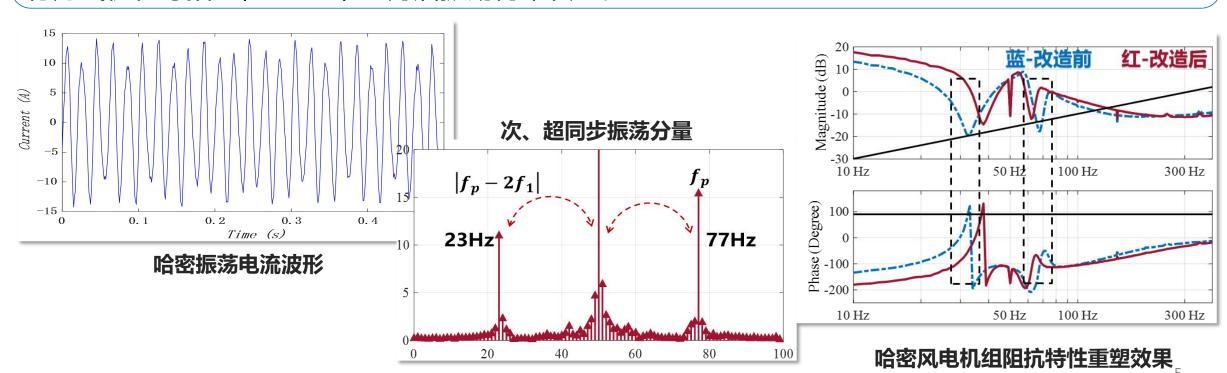
振荡问题	振荡频率	影响范围
新疆哈密风电振荡	10-40Hz 60-90Hz	风电、直流、火电 750kV主网
河北沽源风电振荡	2-9Hz	风电、串补 220kV局部电网
美国德州风电振荡	20-25Hz	风电、串补 送出系统
西班牙光伏发电振荡	25Hz、75Hz	光伏电站 送出系统
德国海上风电场-高压直流系 统振荡	250Hz-260Hz	风电 VSC-HVDC
•••		••• 4





新疆哈密风电振荡: 大规模风电接入弱交流电网系统,振荡频率10~40Hz,60~90Hz

分析与解决措施:基于阻抗分析方法,定位了振荡主导风电机组,通过风电机组控制优化,实现了次/超同步频段的阻抗特性重塑,提升了风电机组接入弱电网的稳定运行能力,综合采取风电与电网运行方式优化等措施,2017年10月后振荡再未发生。





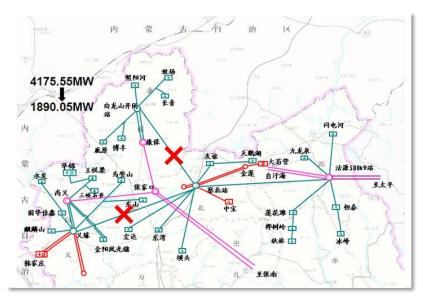
中国电力科学研究院有限公司 CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE



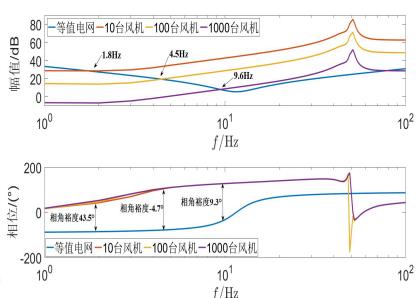
河北沽源风电振荡: 大规模风电经串补线路送出系统,振荡频率2~9Hz

分析与解决措施:基于阻抗分析方法,分析了双馈风电机组次同步频段负电组特性产生的原因,综合

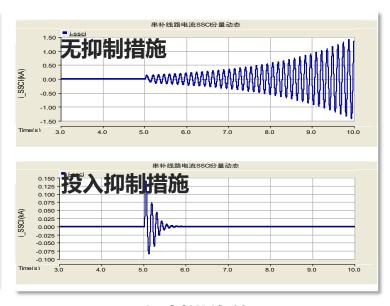
采取风电机组控制优化、增加振荡抑制装置、风电与串补运行方式优化等措施,实现振荡抑制。



沽源风电基地结构图



双馈风电接入串补电网的阻抗分析



抑制措施效果



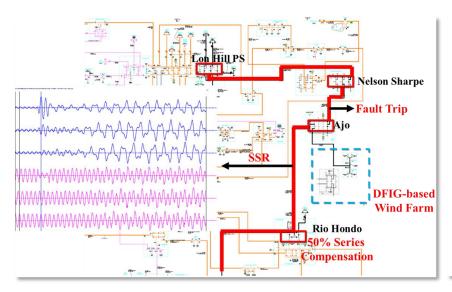
中国电力科学研究院有限公司

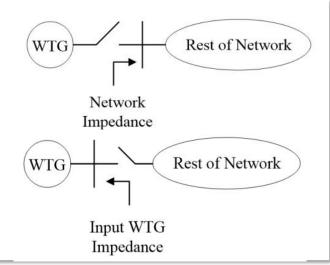


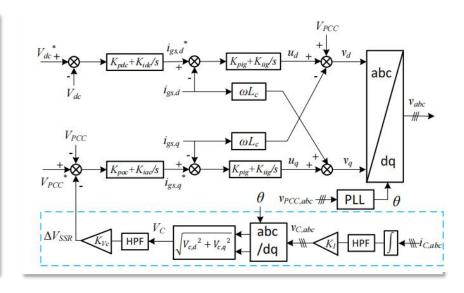
美国德州风电振荡: 风电场经串补线路送出,系统振荡频率20~25Hz

分析与解决措施:基于阻抗分析方法,分析了双馈风电机组定子电抗与串补线路电容的谐振机理,文

献报道采用了风电机组次同步阻尼控制技术,2009年振荡首次发生,2018年振荡再次出现。







美国德州风电系统振荡

风电与电网侧阻抗分析

次同步阻尼控制技术

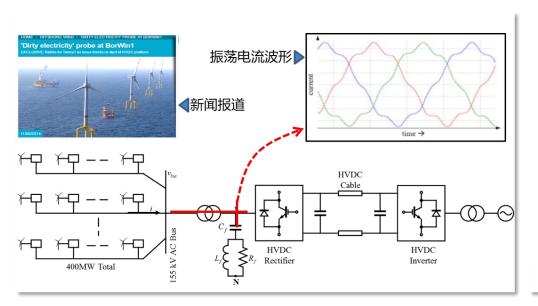
- [1] J. Adams, C. Carter and S. Huang, "ERCOT experience with Sub-synchronous Control Interaction and proposed remediation," PES T&D 2012, 2012, pp. 1-5.
- [2] IEEE Power & Energy Society Technical Report, PES-TR80, "Wind Energy Systems Sub-Synchronous Oscillations: Events and Modeling", Jul. 2020

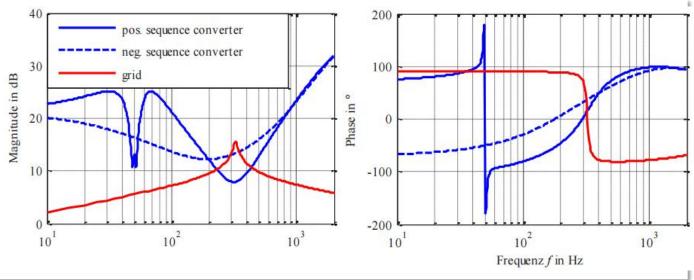




德州北海风电与VSC-HVDC振荡:振荡频率250Hz左右,导致VSC-HVDC整流站滤波电容损坏,系统停运10个月。

分析与解决措施:基于阻抗分析方法,分析了风电接入VSC-HVDC系统高频振荡产生的原因,文献报道通过对整流站的控制优化,消除了振荡风险。





德国北海风电接入VSC-HVDC系统振荡

风电接入VSC-HVDC的阻抗分析

[1] Buchhagen C, Rauscher C, Menze A, et al. BorWin1 - First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids[C]// International ETG Congress 2015; Die Energiewende - Blueprints for the new energy age. VDE, 2016.



主要内容

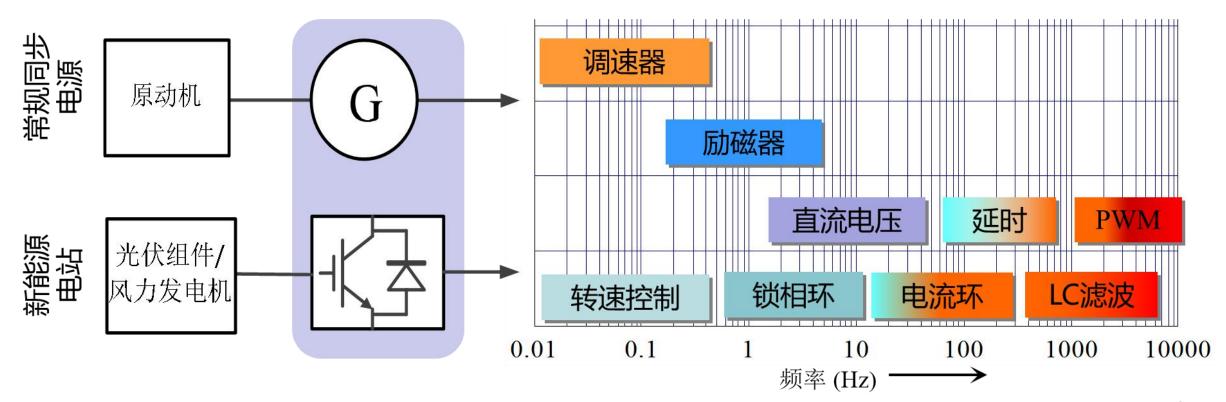
- 一、问题的提出
- 二、新能源并网宽频带振荡机理
- 三、新能源并网宽频带振荡分析方法
- 四、新能源并网宽频带振荡抑制技术
- 五、实证试验与工程应用
- 六、总结与展望



二、新能源并网宽频带振荡机理

1. 新能源发电的宽频带控制方式

与同步发电机组相比,新能源发电通过电力电子装备并网,并网特性涉及到多个控制环路协调配控制带宽横跨5个数量级,呈现宽频带特征。

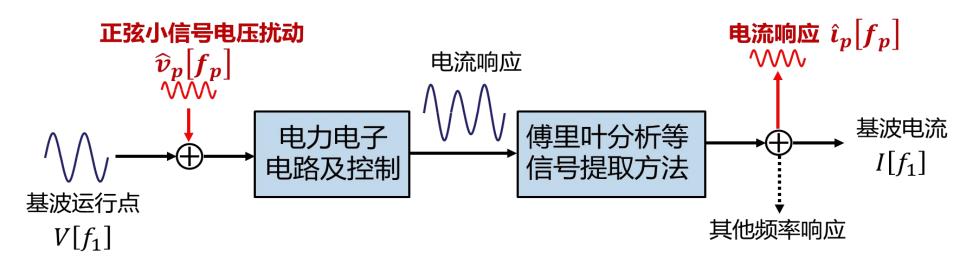




二、新能源并网宽频带振荡机理

2. 宽频带阻抗模型与稳定性分析

阻抗方法是一种电力电子并网系统的宽频带小信号建模与稳定性分析方法,阻抗模型的形式为小信号电压扰动与电流响应之间的传递函数模型,可表征新能源发电及电力电子装置在不同频率小信号扰动下的响应特性。



宽频带小信号外特性模型

$$Z_p(s) = \frac{\hat{v}_p(s)}{\hat{i}_p(s)}$$

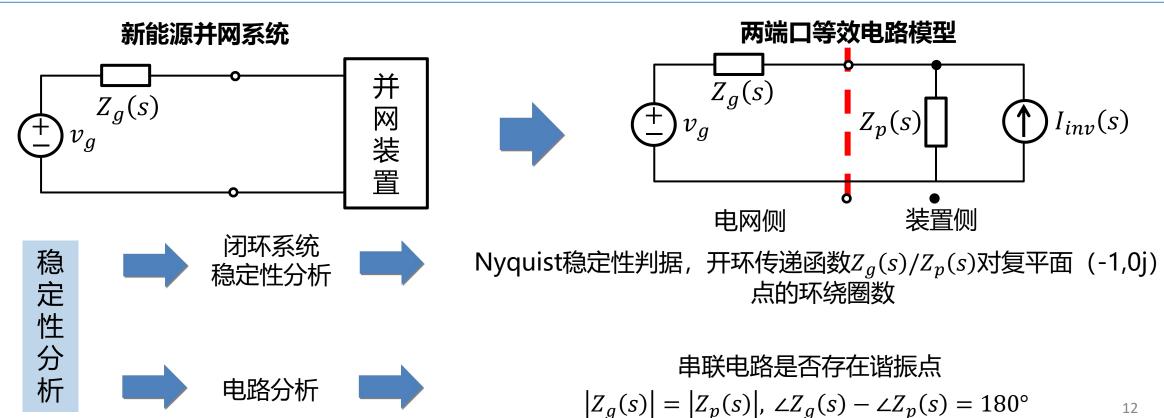
$$Y_p(s) = \frac{\hat{i}_p(s)}{\hat{v}_p(s)}$$



新能源并网宽频带振荡机理

2. 宽频带阻抗模型与稳定性分析

基于阻抗模型可建立新能源并网系统的小信号等效电路模型,系统的稳定分析可采用经典控制理 论的奈奎斯特判据,工程上也可简化为阻抗电路的谐振分析。

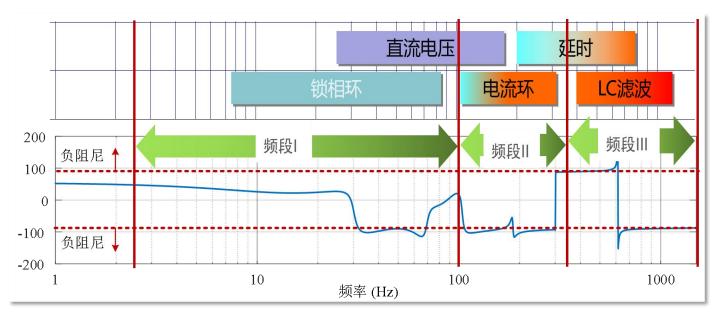


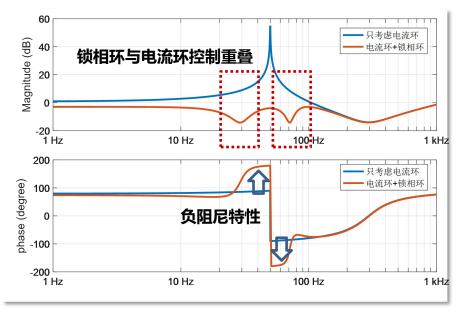


二、新能源并网宽频带振荡机理

3. 新能源发电的控制叠加效应与负阻尼

新能源发电多回路控制存在频段叠加效应,控制响应的固有延时导致重叠频段内的相位滞后,使得其阻抗特性在不同频段呈现负阻尼。新能源发电基地多样化装备在不同频段的负阻尼特性,易导致系统在多个频段的稳定裕度不足,引发宽频带的振荡现象。





新能源发电控制频带划分与重叠

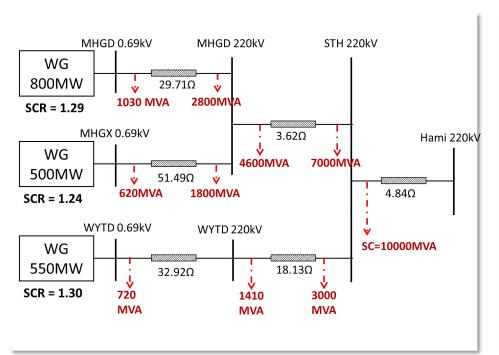
锁相与电流环控制重叠引起的负阻尼



二、新能源并网宽频带振荡机理

4. 新能源发电接入弱电网的宽频带振荡

新能源发电锁相环、直流母线电压环和电流环控制在次/超同步频段叠加产生的负阻尼特性,与弱电网阻抗相互作用,易导致系统次/超同步振荡。



15 $Z_{wf}(s)$ Magnitude (dB) Voltage [%] -30 -40 20 40 60 80 10 Hz 100 Hz 1000 Hz 100 ٨ 15 50 180° Phase (Degree) Current [%] -100 -150 -200 10 Hz 100 Hz 1000 Hz 20 60 40 80 Frequency [Hz]

哈密风电接入弱电网案例 (短路比 < 1.5)

风电接入弱电网的阻抗分析

100

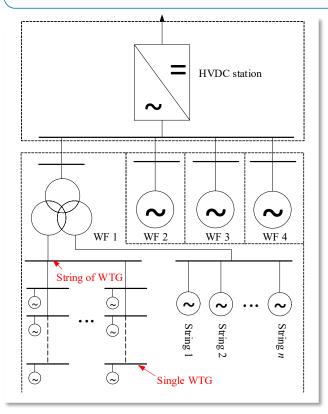
100

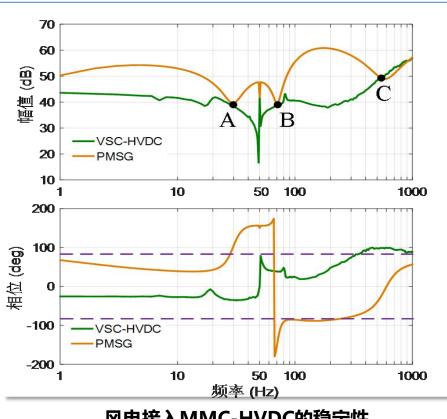


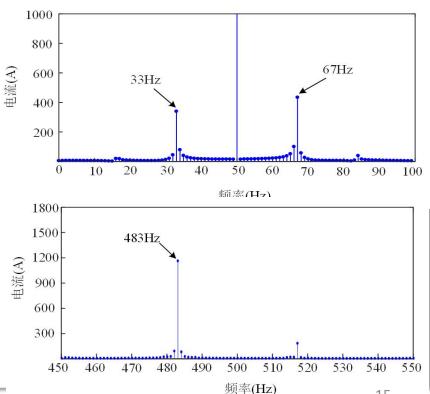
新能源并网宽频带振荡机理

5. 新能源发电接入MMC-HVDC的宽频带振荡

新能源发电次/超同步频段的负阻尼特性,和MMC-HVDC电流控制与延时在高频段叠加产生的负 使得新能源发电接入MMC-HVDC系统的振荡风险频段覆盖次同步到数百Hz。







风电接入MMC-HVDC系统结构示意图

风电接入MMC-HVDC的稳定性

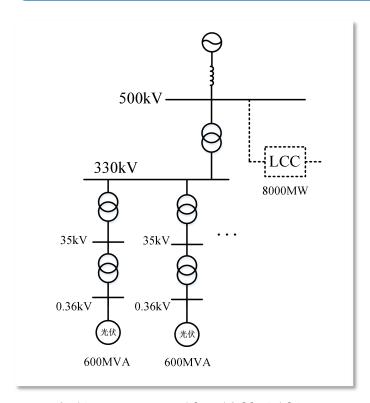
风电接入MMC-HVDC的宽频带振荡仿真

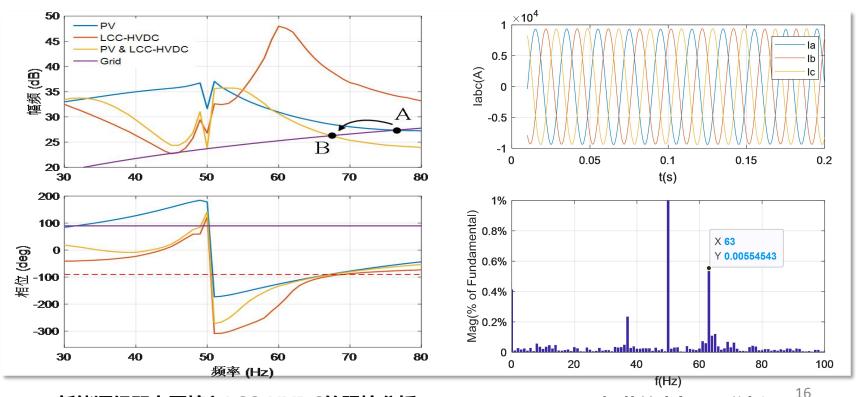


新能源并网宽频带振荡机理

6. 新能源发电经多级升压汇集接入LCC-HVDC系统的宽频带振荡

新能源发电经多级升压汇集接入LCC-HVDC系统是"三北"新能源基地送出的典型场景,直流电 流控制在超同步频段引起的负阻尼特性,将对系统的振荡风险频段与振荡特征产生影响。





新能源经LCC送端系统简化结构

新能源经弱电网接入LCC-HVDC的阻抗分析

振荡仿真与FFT分析

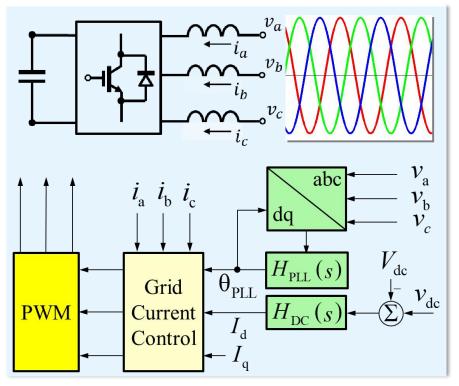


主要内容

- 一、问题的提出
- 二、新能源并网宽频带振荡机理
- 三、新能源并网宽频带振荡分析方法
- 四、新能源并网宽频带振荡抑制技术
- 五、实证试验与工程应用
- 六、总结与展望



新能源发电及电力电子装备的控制建立于三相交流瞬时量,其并网振荡问题可归为电磁时间尺度 的小干扰稳定问题,主要分析方法包括:基于时域状态空间模型的特征值法、基于频域传递函数模型 的阻抗法等。分析模型的参考坐标系包括静止坐标系和同步旋转坐标系。



对象 模型 分析方法 线性化 dq坐标系下的 时域小信号 特征值分析 状态空间模型 微分方程 拉普拉斯 新能源并网系统 Park变换/反变换 变换/反变换 频域小信号 dq阻抗模型 Nyquist判据 abc坐标系下的 频域小信号 微分方程 序阻抗模型 傅里叶分解 18

新能源并网逆变器基本结构

新能源并网振荡分析方法

在相同的前提条件下,时域状态空间模型与dq阻抗模型、序阻抗模型可等效转换,稳定性的分析结果一致。序阻抗方法作为一种基于静止坐标系下的端口外特性模型,在测量验证、评价装备特性及指导控制改进方面具有优势。

时域状态空间模型



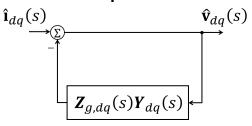
频域dq阻抗模型



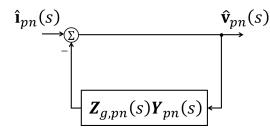
频域序阻抗模型

模型

 $A\dot{X} = X$



矩阵变换



存在右半平面特征值 系统<mark>不稳定</mark> 方法1:特征轨迹对(-1,0)点的环绕圈数与开环系统极点分布

方法2: 求解闭环系统极点(特征方程根),存在右半平面极点(特征根),系统不稳定

 $s = 0.064 \pm j2\pi \times 23.27$

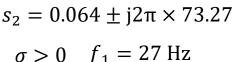
 $\sigma > 0$ f = 23 Hz

+

 $s = 0.064 \pm j2\pi \times 23.27$

 $\sigma > 0 \qquad f = 23 \text{ Hz}$

频率平移

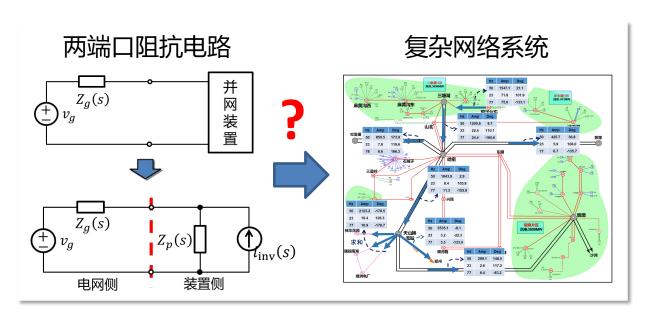


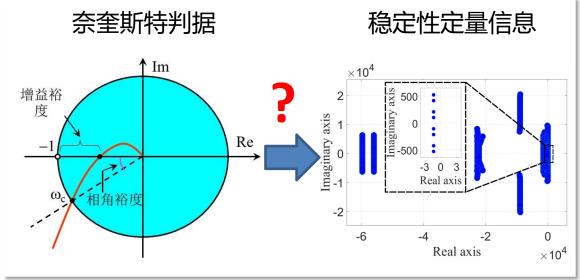
$$\sigma > 0$$
 $f_1 = 27 \text{ Hz}$
 $f_2 = 73 \text{ Hz}$

 $s_1 = 0.064 \pm j2\pi \times 26.73$



应用于大规模新能源基地的稳定性分析,序阻抗方法存在以下不足:一是实际装备核心控制算法和参数保密,阻抗解析模型往往难以获取;二是装备频率耦合特性与复杂汇集网络特性相互作用,大系统的建模面临挑战;三是奈奎斯特判据无法给出定量的系统稳定指标,无法满足大系统分析对主导装置、主导因素等定量信息的要求。

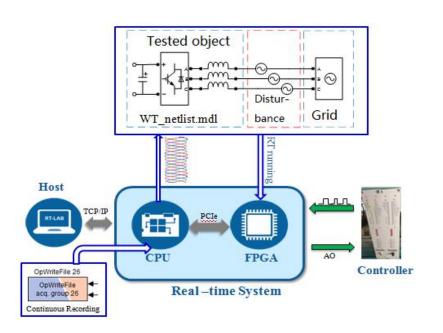


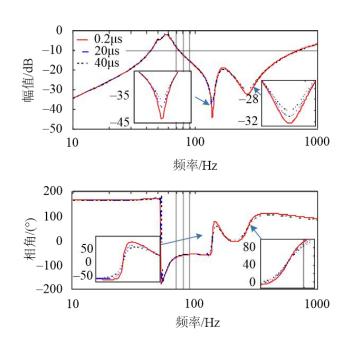




1. 新能源发电及电力电子装备宽频带阻抗扫描方法

提出了基于控制硬件在环仿真的新能源及电力电子装备阻抗扫描方法,建立了阻抗测量误差影响的数学模型,分析并消除了仿真步长、接口延时、开关模型参数在不同频段对阻抗测量精度的影响,建立了覆盖国内80%装机容量以上的阻抗模型库。







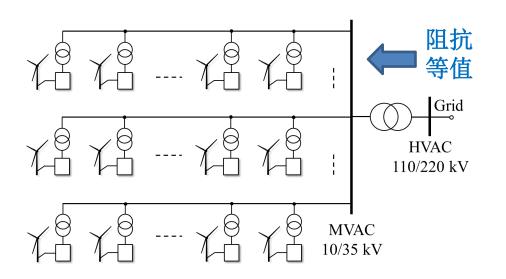
新能源发电宽频带阻抗扫描

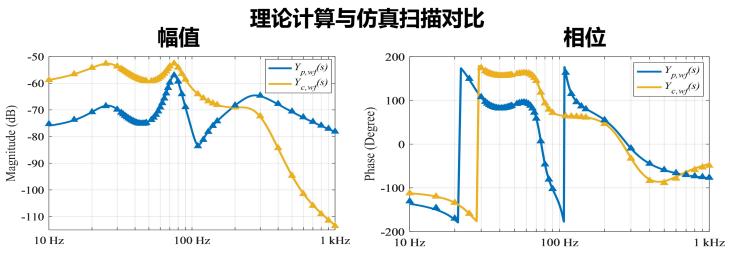
仿真步长对阻抗扫描结果影响



2. 新能源场站的宽频带阻抗等值建模方法

新能源发电场站包含数十台装备及升压汇集网络,场站的整体阻抗特性由装备特性和网络特性共同决定,提出了计及频率耦合和汇集网络的新能源发电场站阻抗等值方法,能够用于准确分析实际系统振荡问题中普遍存在的频率耦合问题。





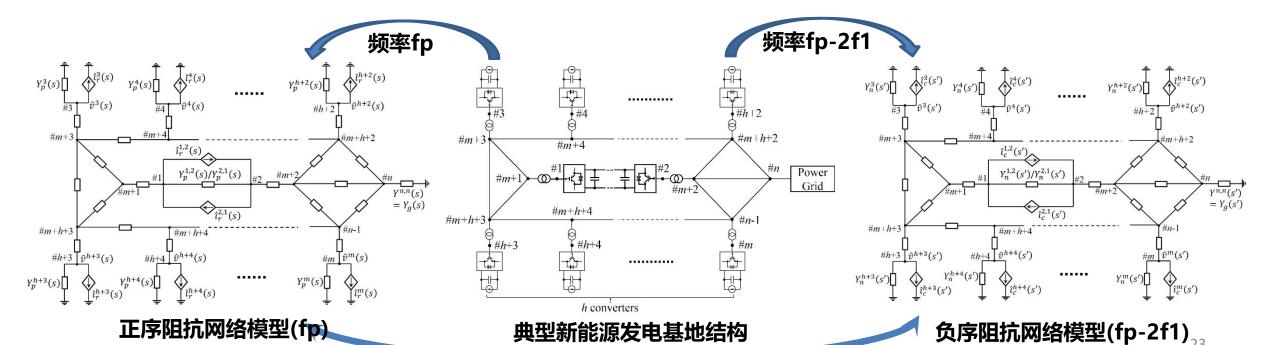
等值
$$Y_{p,wf}(s) = \sum_{i=1}^{n} Y_{0i}(s) - y_0^T(s) \{Y_N(s) - Y_r(s')Y_{N'}^{-1}(s')Y_c(s)\}^{-1}y_0(s)$$
 导纳

耦合
导纳
$$Y_{c,wf}(s) = y_0^T(s')\{Y_{N'}(s') - Y_c(s)Y_N^{-1}(s)Y_r(s')\}^{-1}Y_c(s)Y_N^{-1}(s)y_0(s)$$



3. 新能源基地宽频带耦合阻抗网络建模方法

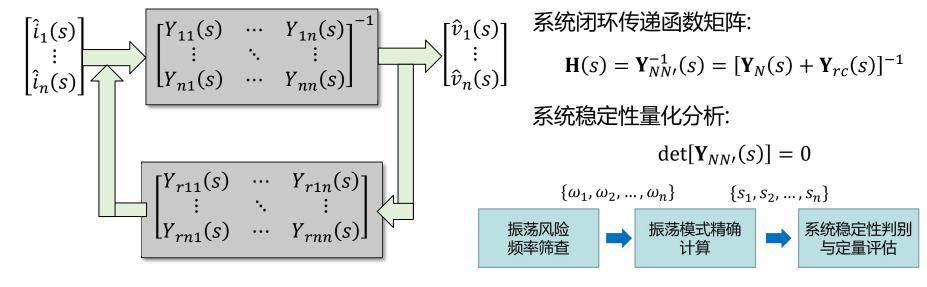
提出了新能源基地宽频带耦合阻抗网络建模方法,将系统描述为两个(或多个)相互耦合的序阻抗网络,拓扑与实际电网结构一致,构建方法与传统电力系统节点导纳矩阵相同,能够描述振荡在网络中的传递和耦合过程,与实际系统振荡特征一致。





4. 新能源基地宽频带振荡稳定性量化分析方法

基于多变量频域理论,建立了阻抗网络模型与多输入多输出传递矩阵模型的内在联系。针对实际系统复杂的网络结构可在不同关键断面进行等值划分和端口等值,提出了最大峰值奈奎斯特判据与振荡模式分析相结合的系统宽频带振荡稳定性量化分析方法。



▲多输入多输出系统模型

▲系统稳定性量化分析

阻尼比灵敏度:

$$\rho_{ri}^{w} = \frac{\Delta \xi_{ri}}{\Delta p_{w}}$$

参与因子矩阵:

$$\begin{bmatrix} R_{11}^2 & R_{11}R_{21} & \cdots & R_{11}R_{n1} \\ R_{21}R_{11} & R_{21}^2 & \cdots & R_{21}R_{n1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1}R_{11} & R_{n1}R_{21} & \cdots & R_{n1}^2 \end{bmatrix}$$

▲稳定性量化指标

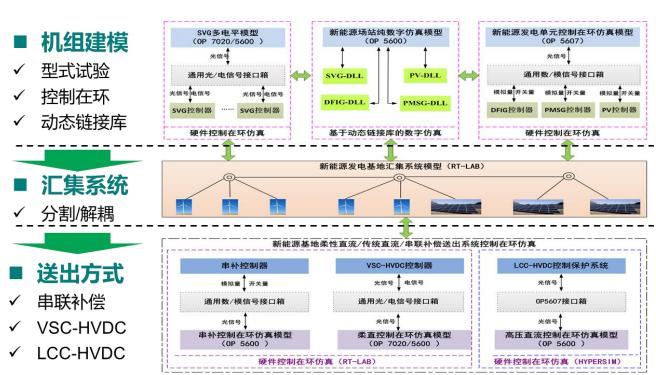


5. 新能源基地全电磁暂态实时仿真平台

提出了新能源发电单元精细化建模及场站等值建模方法,搭建了新能源基地经特高压/柔性直流送端系统的实时仿真环境,可开展新能源单机、场站、集群的宽频带振荡仿真分析及抑制措施验证。



实时仿真平台实景图



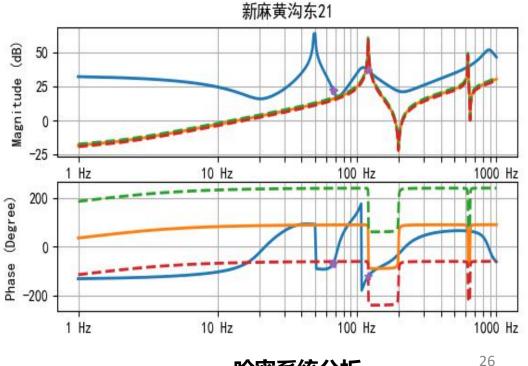
实时仿真平台结构图



6. 新能源基地宽频带振荡分析软件

基于阻抗方法开发了含高比例新能源的电力系统宽频带稳定性分析软件,具有装置阻抗模型管理、系统编辑和图形化、系统运行方式定义、振荡风险评估等功能。





软件主界面 哈密系统分析



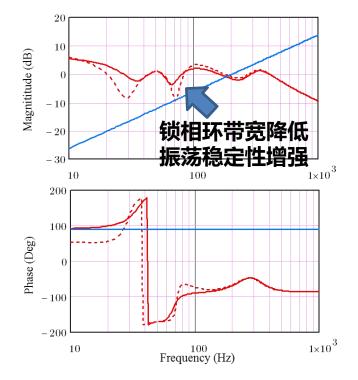
主要内容

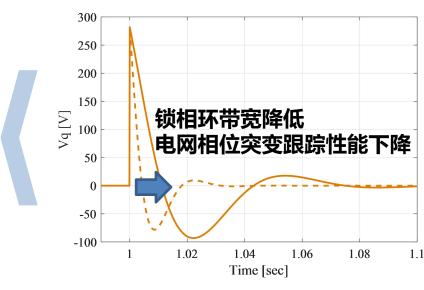
- 一、问题的提出
- 二、新能源并网宽频带振荡机理
- 三、新能源并网宽频带振荡分析方法
- 四、新能源并网宽频带振荡抑制技术
- 五、实证试验与工程应用
- 六、总结与展望

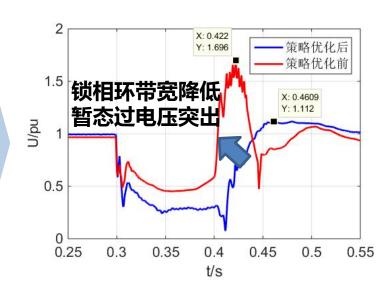


1. 新能源发电振荡稳定性与故障穿越性能相互制约

新能源发电的振荡稳定性与故障穿越性能相互制约,降低锁相环带宽可提升弱电网下的稳定运行能力,降低振荡风险,然而,将导致对电网相位突变的跟踪性能下降,引发故障穿越失败或故障恢复时的暂态过电压脱网。



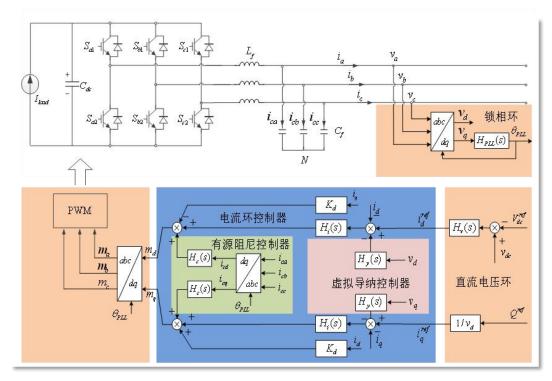


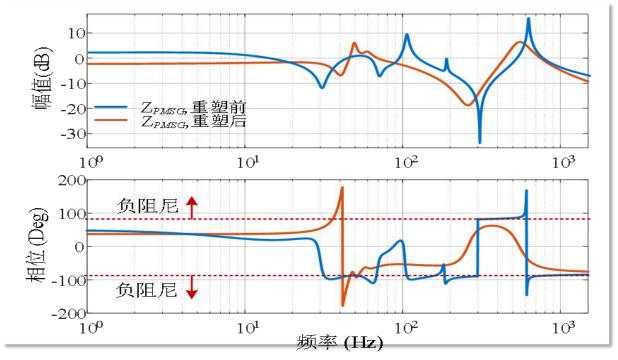




2. 新能源发电装备特性优化与振荡抑制

提出了锁相环参数优化、虚拟导纳和有源阻尼相结合的宽频带阻抗重塑技术,通过协同优化多回路控制及阻尼参数,在不影响故障穿越性能的情况下实现对宽频带振荡的有效抑制。





新能源机组宽频带阻抗重塑策略

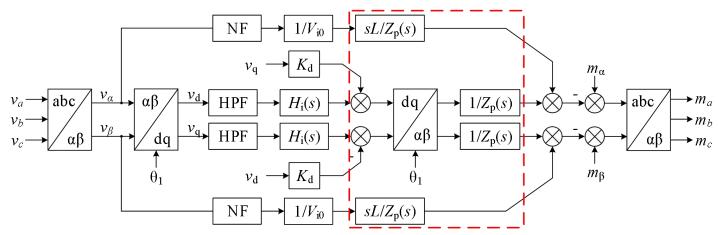
新能源机组宽频带阻抗重塑效果



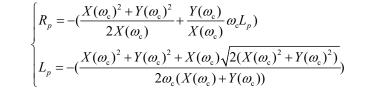
3. 新能源场站阻尼提升与振荡抑制 (1)

多重约束下新能源机组的特性提升范围有限,提出了基于并联虚拟阻抗的SVG阻抗重塑与振荡抑制技术,将SVG在次/超同步频段的阻抗特性塑造为正电阻特性,提升场站整体的阻尼特性。

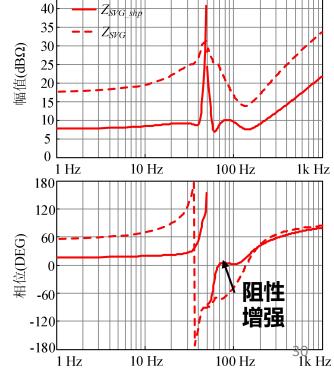
并联虚拟阻抗控制框图



虚拟阻抗控制参数设计



虚拟阻抗控制加入前后对比

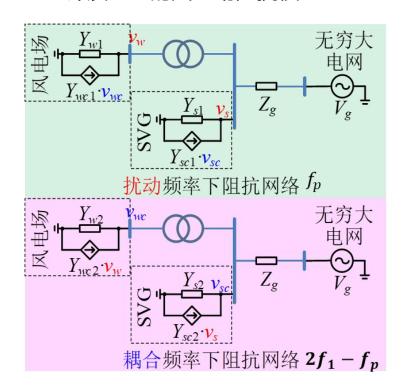


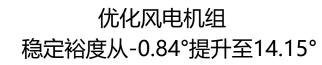


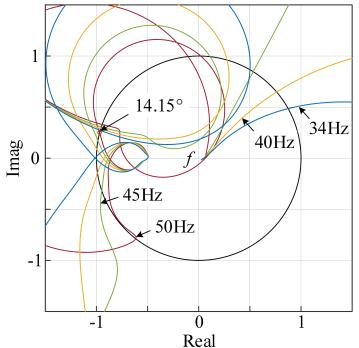
3. 新能源场站阻尼提升与振荡抑制 (2)

对新能源发电与SVG多回路控制参数进行协同设计,相比单独进行新能源机组或SVG控制优化,可进一步提升相角裕度20°~30°。

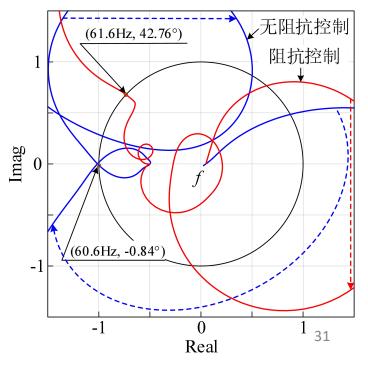
计及SVG的风电场阻抗模型







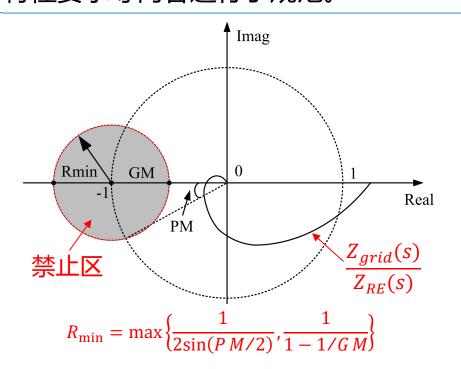
风电机组与SVG协同优化 稳定裕度进一步提升至42.76°





4. 针对宽频带阻抗特性的新能源发电并网标准 (1)

提出了适用于不同并网条件的新能源发电分频段阻抗特性要求,制定了行业标准NB/T 10651-2021《风电场阻抗特性评估技术规范》,对风电场阻抗特性评估的模型要求、测试方法、评估工况、特性要求等内容进行了规范。



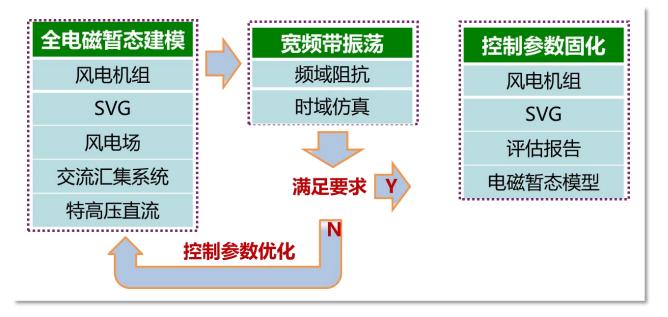
新能源发电类型	频段I	频段Ⅱ	频段Ⅲ
双馈风电	2.5~20Hz	20~100Hz	100~2000Hz
	$R_{\min} \ge 0.2$	$R_{\min} \ge 0.2$	$R_{\min} \ge 0.15$
全功率风电	2.5~100Hz	100~300Hz	300~2000Hz
	$R_{\min} \ge 0.25$	$R_{\min} \ge 0.2$	$R_{\min} \ge 0.15$



4. 针对宽频带阻抗特性的新能源发电并网标准 (2)

在标准中规定了阻抗分析与实时仿真相结合的风电场全工况宽频带振荡风险评估方式,保证振荡 风险的可验证、可复现,同时为振荡抑制措施的制定和验证提供基础。

无功出力		左动山士
风电机组	无功补偿装置	有功出力
对应有功出力下的最大容 性无功出力	满发容性无功、零出力、退出运 行	
功率因数1.0	满发容性无功、零出力、退出运 行、满发感性无功	10%、20%、 30%、40%、 50%、60%、 70%、80%、
对应有功出力下的最大感 性无功出力	满发容性无功、零出力、退出运 行	90%、100%
静止无功发生器定电压控		





主要内容

- 一、问题的提出
- 二、新能源并网宽频带振荡机理
- 三、新能源并网宽频带振荡分析方法
- 四、新能源并网宽频带振荡抑制技术
- 五、实证试验与工程应用
- 六、总结与展望



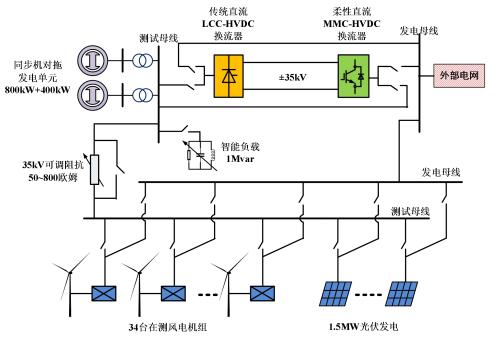
五、实证试验与工程应用

1. 35kV新能源发电汇集送出系统实证平台

在张北试验基地,建立了新能源发电汇集与送出实证平台,包括LCC-MMC双端直流系统、同步机对拖发电单元、可调线路阻抗等,可灵活接入基地所有在测风电机组和光伏逆变器,开展新能源发电接入弱交流电网、传统直流、柔性直流系统的运行特性试验。



张北基地实景图



实证平台结构图



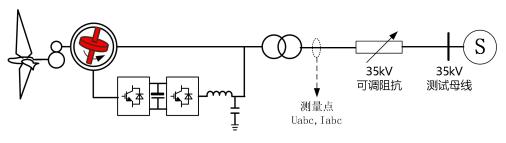
五、实证试验与工程应用

1.35kV新能源发电汇集送出系统实证平台-风电次/超同步振荡复现与抑制试验

基于实证平台,复现了实际双馈风电机组接入弱电网的次/超同步振荡现象(45Hz和55Hz),并通过调整控制策略实现了振荡在线抑制。

500

电压M



▲测试系统示意图

可调降	阻抗		
电阻(Ω)	电抗(Ω)	短路比	风电机组出力
10	480	1.1	0.4pu

25.5 21 21.5 22 22.5 23 23.5 时间 [sec] Ⅰ投入振荡抑制控制策略, 三相电流 振荡消除 1000 电流 [A] -1000 -1500 21.5 22 22.5 23 23.5 25.5 36

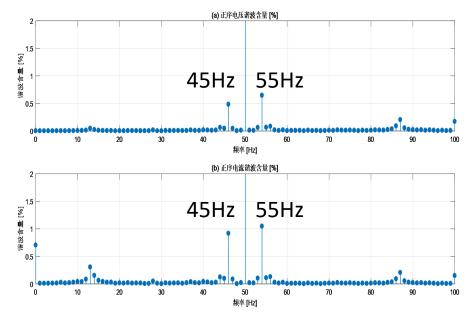
三相电压

▲试验工况

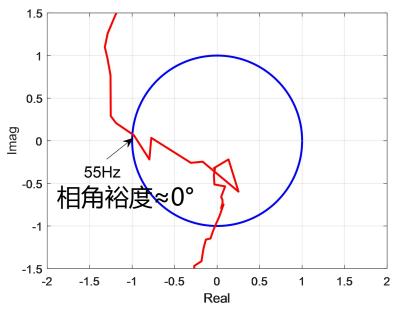


1. 35kV新能源发电汇集送出系统实证平台-风电次/超同步振荡复现与抑制试验

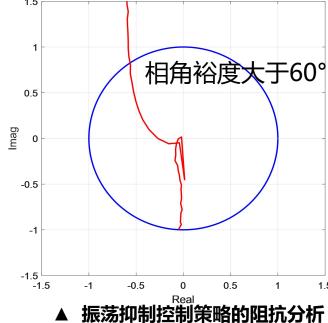
试验结果与基于控制在环扫描的阻抗分析结果一致,通过控制优化,系统稳定的相角裕度从0°左 右提升到60°以上。



▲试验风电机组机端电压电流FFT结果



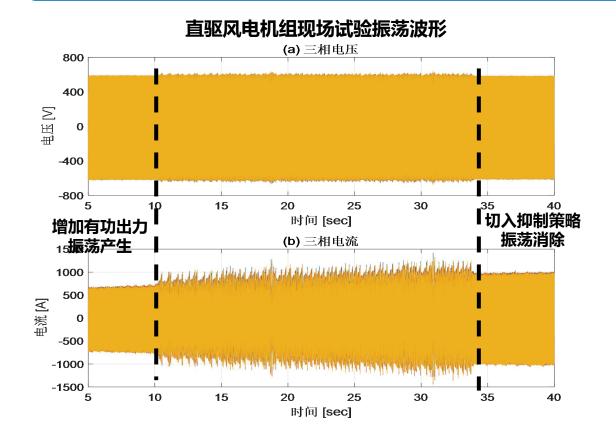
▲ 初始控制策略的阻抗分析



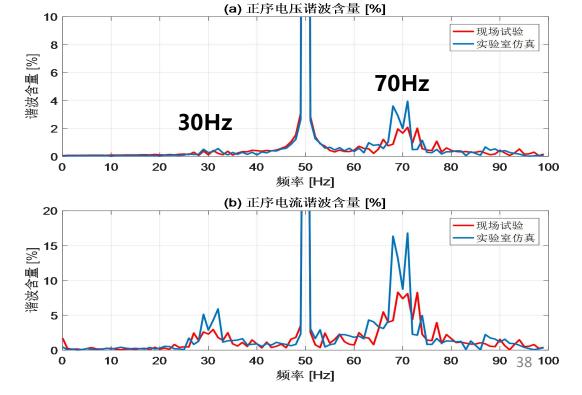


1.35kV新能源发电汇集送出系统实证平台-风电次/超同步振荡复现与抑制试验

基于实证平台和阻抗分析,复现了实际全功率风电机组接入弱电网的次/超同步振荡现象,并通过调整控制策略实现了振荡在线抑制,现场试验结果与理论分析和实验室仿真结果一致。



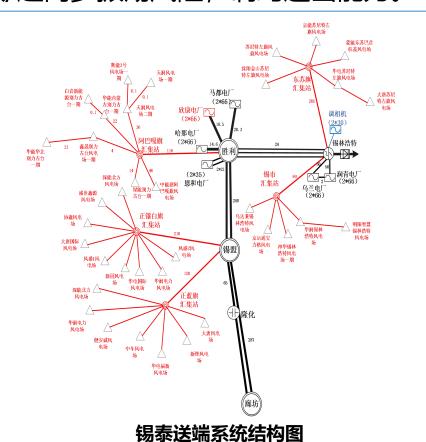
现场试验与实验室仿真振荡分量FFT结果对比





2. 锡泰直流工程——新能源基地经特高压直流送出工程

锡盟送端700万kW风电经特高压直流、特高压交流(含串补),2020年风电平价上网抢装并网,存在次/超同步振荡风险,制约送出能力。



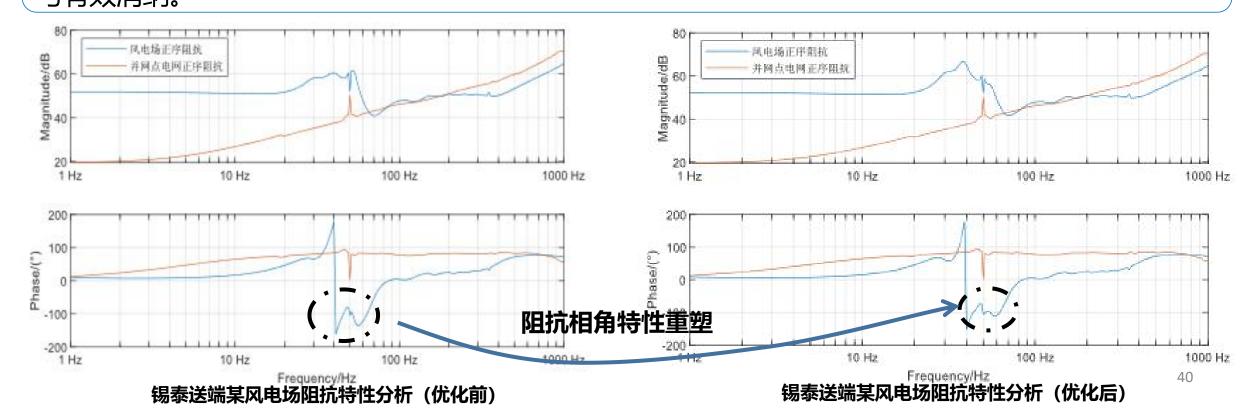
全电磁暂态 控制参数固化 宽频带振荡 建模 频域阻抗 风电机组 风电机组 时域仿真 **SVG** SVG 足 评估报告 风电场 要求 暂态过电压 交流汇集系 机电暂态参数 直流故障 统 交流故障 特高压直流 电磁暂态模型

新能源控制优化及固化技术路线



2. 锡泰直流工程——新能源基地经特高压直流送出工程

评估了锡泰直流送端36个场站共700万kW风电的次/超同步振荡风险,开展了7个振荡风险场站 (总容量97.5万kW) 风电机组的阻抗重塑与振荡抑制技术升级,保障了锡泰送端新能源的安全并网 与有效消纳。



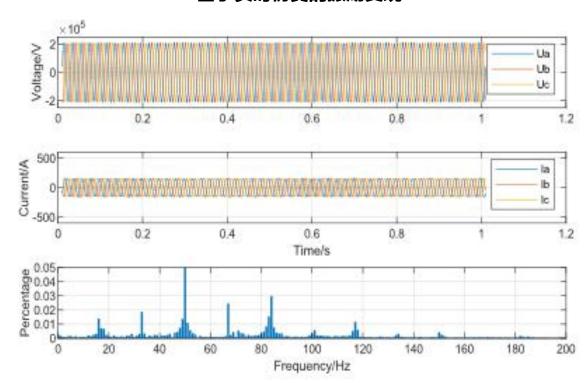


中国电力科学研究院有限公司 CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

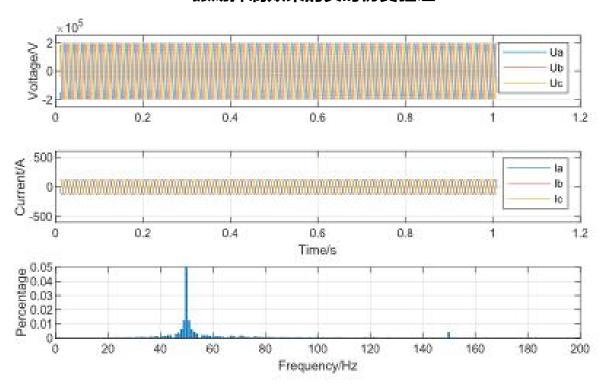
五、实证试验与工程应用

2. 锡泰直流工程——新能源基地经特高压直流送出工程

基于实时仿真的振荡复现



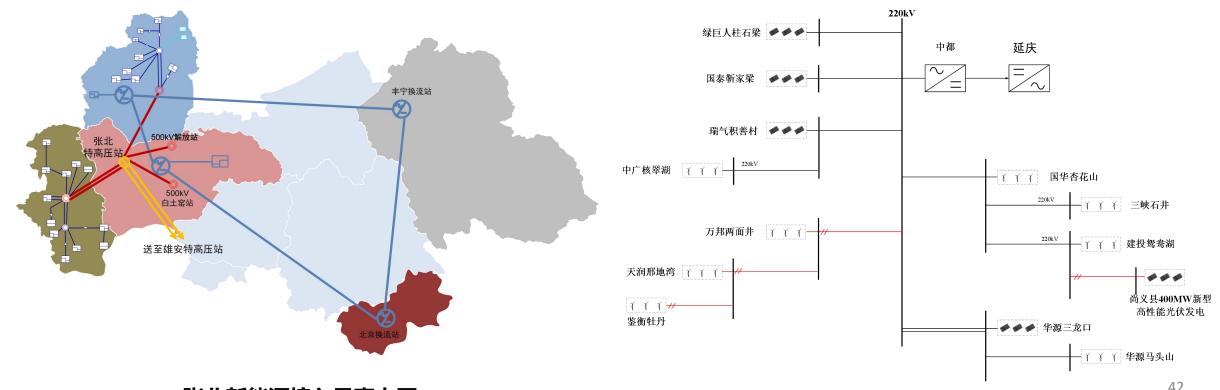
振荡抑制效果的实时仿真验证





3. 张北柔直工程——新能源基地经柔性直流送出工程

张北柔直工程于2020年6月投运,送端规划450万kW新能源通过张北站(300万kW)、康保站 (150万kW) 两个孤岛站接入直流电网,调试过程发生不同频段的振荡现象,严重影响系统安全运行。

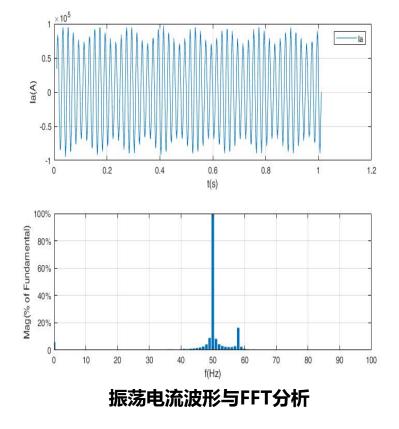


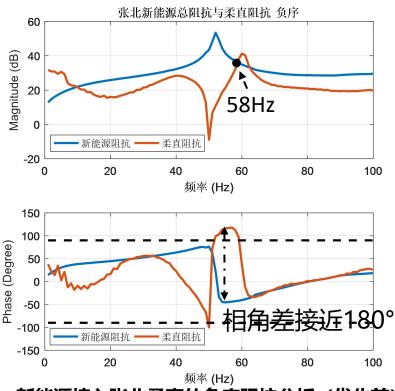
中都站新能源接入情况(截至2021年9月)



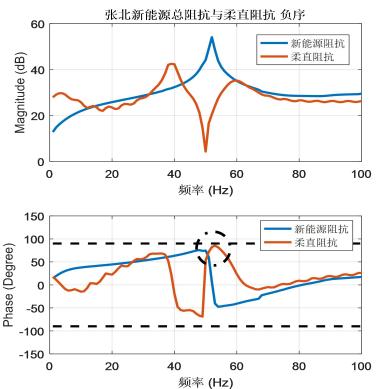
3. 张北柔直工程——新能源基地经柔性直流送出工程

基于实时仿真和序阻抗分析,揭示了张北站58Hz负序振荡产生的机理及主导因素,提出了抑制策略,并开展了现场试验,世界首次实现了新能源发电接入柔性直流系统的振荡复现与抑制的现场验证。





新能源接入张北柔直的负序阻抗分析 (优化前)

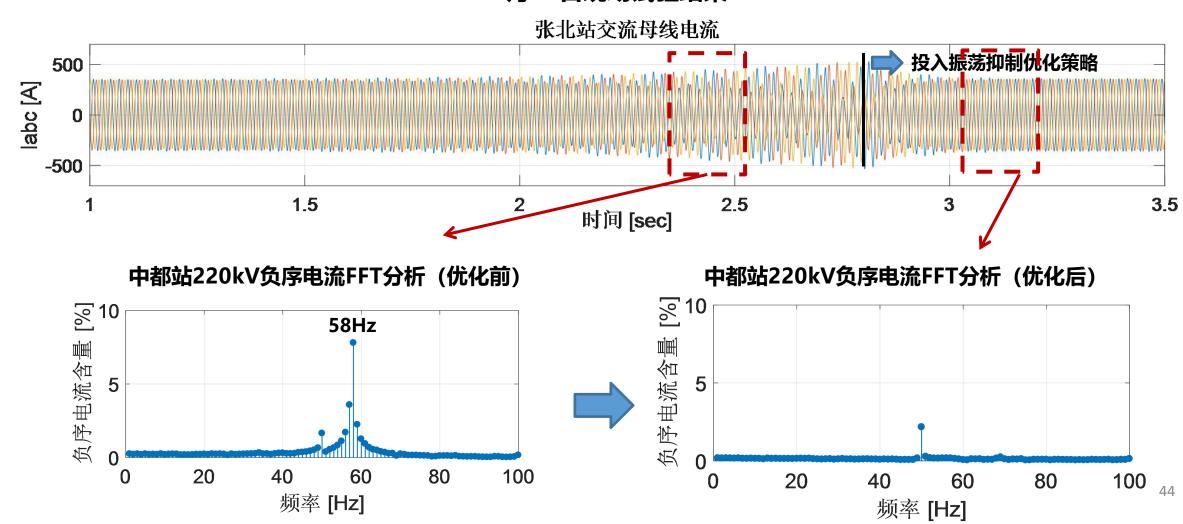


新能源接入张北柔直的负序阻抗分析(优化后)



3. 张北柔直工程——新能源基地经柔性直流送出工程

7月21日现场试验结果





主要内容

- 一、问题的提出
- 二、新能源并网宽频带振荡机理
- 三、新能源并网宽频带振荡分析方法
- 四、新能源并网宽频带振荡抑制技术
- 五、实证试验与工程应用
- 六、总结与展望



六、总结与展望

- □ 未来,我国新能源发电将快速发展,宽频带振荡问题是大规模新能源基地接入电网运行的潜在风险,也是以新能源为主体的新型电力系统系统首要解决的关键性核心问题。
- □ 针对新能源发电宽频带振荡问题,我们团队研究并建立了系统化的分析方法、仿真软件、 实证平台,并在多个实际工程中得到了应用验证。
- □ 未来,我们将在理论研究、技术研发、平台建设等方面继续开展深入研究工作,为未来 我国构建以新能源为主体的新型电力系统规划、运行和控制提供科技支撑。





- 1. **王伟胜,张冲,何国庆,李光辉**,张剑云,**汪海蛟**.大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J].电网技术,2017,41(04):1050-1060.
- **2. 李光辉,王伟胜,张兴,何国庆,刘纯**.双馈风电场并网次/超同步振荡建模与机理分析(一):考虑功率外环的阻抗建模[J/OL].中国电机工程学报:1-12.
- 3. 李光辉,王伟胜,刘纯,金一丁,何国庆.直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6547-6562.
- **4. 李光辉,王伟胜,郭剑波**,陈新,**刘纯,何国庆**.风电场经MMC-HVDC送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5281-5297+5575.
- 5. 李光辉,王伟胜,刘纯,何国庆,叶俭,孙建.基于控制硬件在环的风电机组阻抗测量及影响因素分析[J].电网技术,2019,43(05):1624-1631.
- **6. 张冲,王伟胜,何国庆,李光辉,汪海蛟**,田元冶.基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6757-6767+7067.
- 7. Guoqing He, Weisheng Wang, Haijiao Wang. Coordination Control Method for Multi-Wind Farm Systems to Prevent Sub/Super- Synchronous Oscillations. CSEE Journal of Power and Energy Systems, accepted
- **8. Haijiao Wang**, Christoph Buchhagen, Jian Sun. Methods to aggregate turbine and network impedance for wind farm resonance analysis. IET Renewable Power Generation, Vol. 14 Iss. 8, pp. 1304-1311.3.
- 9. 汪海蛟, 何国庆, 刘纯. 计及频率耦合和汇集网络的风电场序阻抗模型等值方法. 电力系统自动化, Vol.43 No.15 Aug.10,2019



谢谢!

王伟胜 博士, 教授级高工

wangws@epri.sgcc.com.cn

