



数据驱动的电力系统强迫振荡源定位

汇报人：姜涛

单位：东北电力大学

汇报提纲

一、研究背景

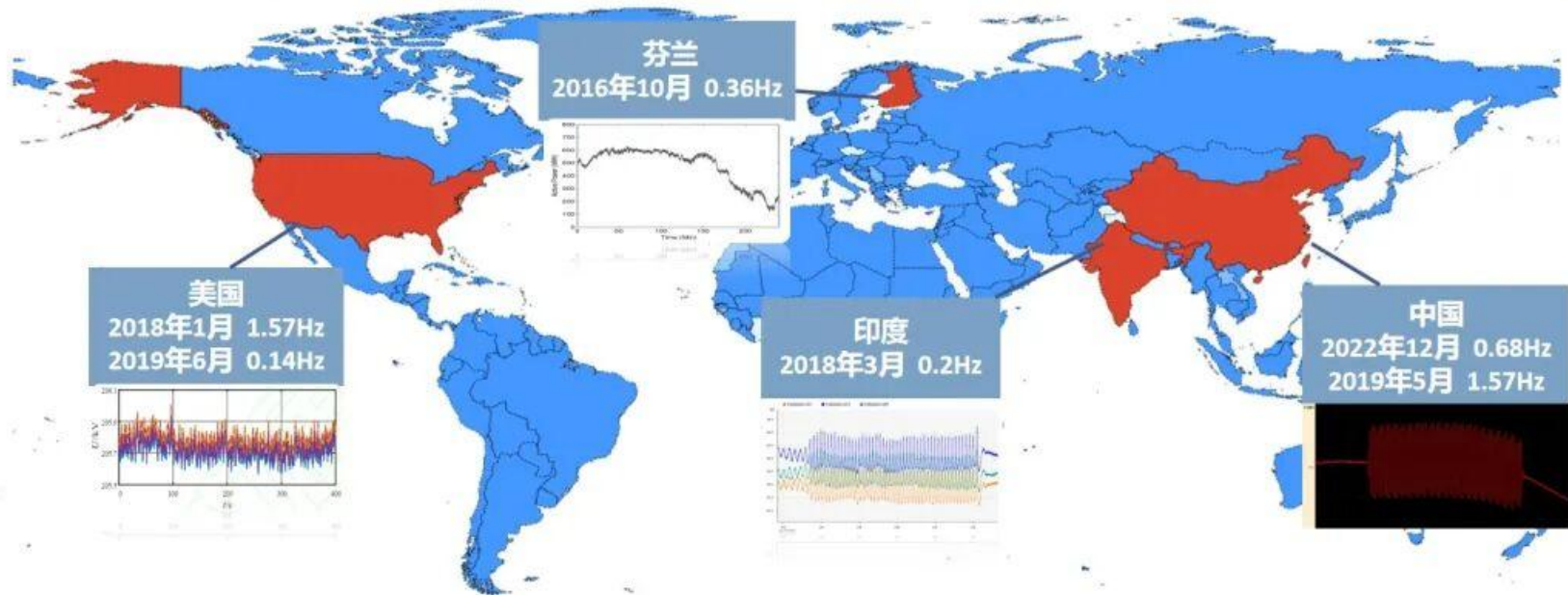
二、广域量测信息中强迫振荡分量提取

三、数据驱动的强迫振荡源定位

四、强迫振荡源定位性能提升

五、结论与展望

■ 电力系统**强迫振荡**是威胁电网安全稳定运行的重要因素之一



- 强迫振荡具有**起振快、随机性强、失去振荡源后快速平息**的特点，若不采取有效措施及时抑制，持续的强迫振荡将严重威胁电网的安全稳定运行

■ 快速准确定位强迫振荡源是抑制强迫振荡的关键

■ 现有强迫振荡源定位方法主要可分为**模型驱动方法**与**数据驱动方法**



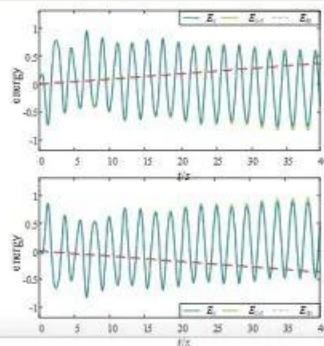
➤ **耗散能量流 (dissipating energy flow, DEF)** 由于物理意义清晰、计算简单、定位精度高，已在实际电网得到广泛应用

■ 耗散能量流借助网络中能量流向辨识振荡源及振荡路径

耗散能量流

$$W_{dp} = \int (\Delta P_{ij} d\Delta\theta_j + \Delta Q_{ij} d(\Delta \ln U_j))$$
$$= \int (2\pi\Delta P_{ij} \Delta f_j dt + \Delta Q_{ij} d(\Delta \ln U_j))$$

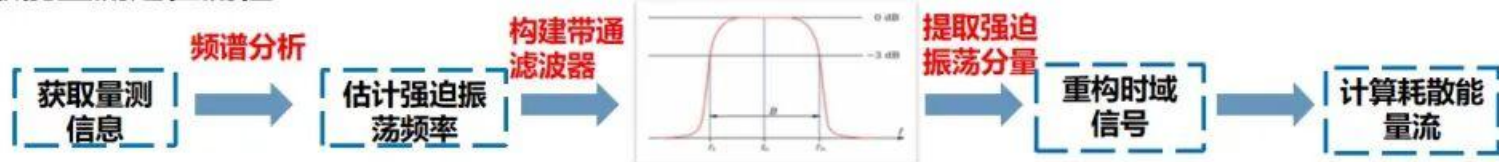
- ✓ 强迫振荡期间，强迫振荡源持续向电网注入振荡能量



■ 非振荡源

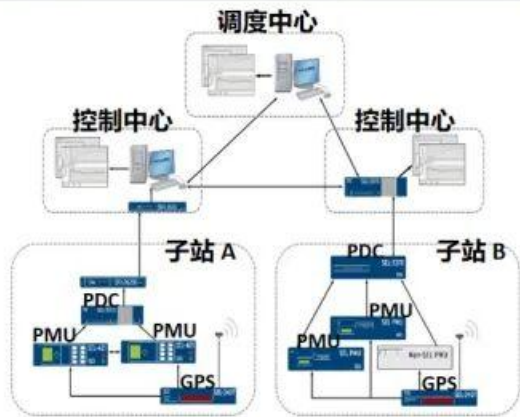
■ 振荡源

耗散能量流定位流程

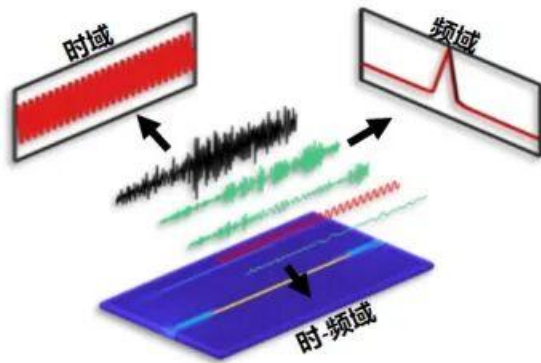


- 受限于**振荡时变特性**、**振荡模式可观性**、**量测噪声干扰**等因素，传统耗散能量流法定位精度受限

■ 强迫振荡源定位的精度及效率亟需进一步提升



获取数据



➤ 数据驱动的强迫振荡源定位研究思路:

强迫振荡分量提取

- 强迫振荡频率估计
- 强迫振荡分量自适应提取

数据支撑

强迫振荡源定位

- 强迫振荡源频域定位
- 强迫振荡源时-频域定位

性能提升

振荡源定位性能提升

- 强迫振荡源定位精度提升
- 强迫振荡源定位效率提升

汇报提纲

一、研究背景

二、广域量测信息中强迫振荡分量提取

三、数据驱动的强迫振荡源定位

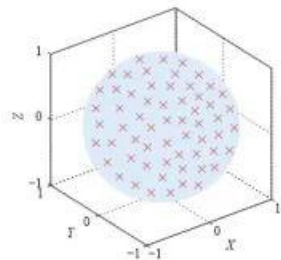
四、强迫振荡源定位性能提升

五、结论与展望

【强迫振荡分量时域提取方法】

- 采用多元经验模态分解(MEMD)对量测信息进行同步分解

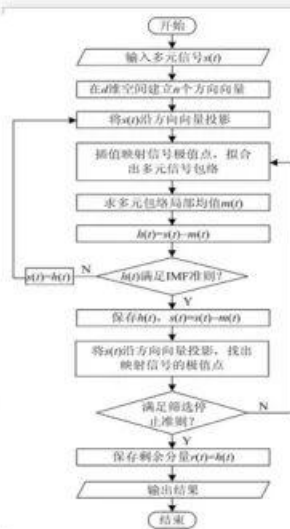
多元经验模态分解



方向向量在超球面上的投影

$$\Delta P_{ij}(t) = \sum_{m=1}^I \Delta P_{ij,IMF,m}(t) + r(t)$$

- ✓ 通过逐次投影，将多通道量测信息同步分解为一组时域IMF分量



强迫振荡分量提取

构造方程组

$$\Delta P_{ij,IMF,m}(d) = A_m \cos(\Omega_m d + \phi_m)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{ij,IMF,m}(d-1) = A_m \cos[\Omega_m(d-1) + \phi_m] \\ \Delta P_{ij,IMF,m}(d) = A_m \cos[\Omega_m d + \phi_m] \\ \Delta P_{ij,IMF,m}(d+1) = A_m \cos[\Omega_m(d+1) + \phi_m] \end{cases}$$

联立

$$A_m^2 \sin^2(\Omega_m) = \Delta P_{ij,IMF,m}^2(d) - \Delta P_{ij,IMF,m}(d-1) \Delta P_{ij,IMF,m}(d+1)$$

离散点能量

$$\psi_m(d) = A_m^2 \Omega_m^2 = \Delta P_{ij,IMF,m}^2(d) -$$

$$\Delta P_{ij,IMF,m}(d-1) \Delta P_{ij,IMF,m}(d+1)$$

IMF信号能量

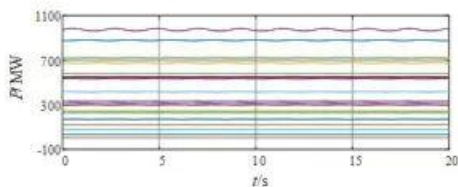
$$E_m = \sum_{d=1}^T \psi_m(d)$$

- ✓ Teager能量最大的IMF分量为强迫振荡分量

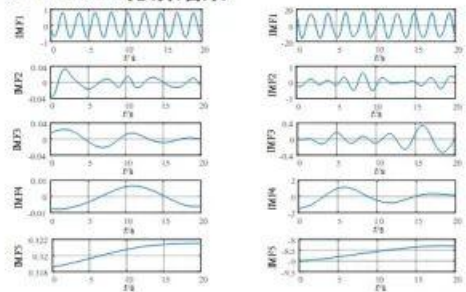
【强迫振荡分量时域提取方法】

算例分析

◆ 强迫振荡量测数据



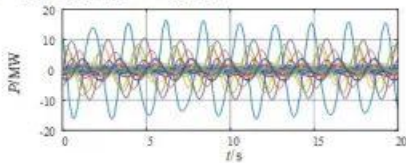
◆ MEMD分解结果



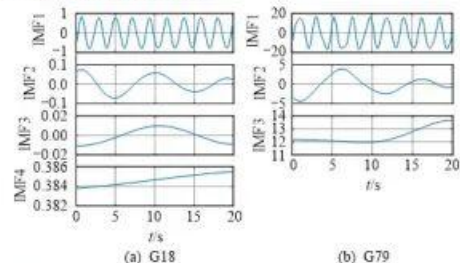
◆ Teager能量计算

序号	IMF1			IMF2			IMF3		
	E	η	f	E	η	f	E	η	f
G79	1378	99.97	0.46	0.418	0.02	0.38	0.051	0.01	0.25
G65	526.4	99.96	0.46	0.163	0.03	0.27	0.011	0.01	0.14
G77	347.3	99.96	0.46	0.098	0.03	0.33	0.005	0.01	0.24
G30	245.4	99.95	0.46	0.081	0.04	0.32	0.007	0.01	0.18
G35	207.1	99.95	0.47	0.088	0.04	0.33	0.010	0.01	0.20
G15	74.76	99.98	0.46	0.014	0.01	0.28	0.002	0.01	0.21
G140	65.78	99.97	0.47	0.011	0.02	0.29	0.006	0.01	0.20
G118	59.33	99.96	0.46	0.011	0.03	0.31	0.001	0.01	0.19
G9	26.72	99.98	0.46	0.004	0.01	0.28	0.001	0.01	0.20
G11	26.39	99.96	0.46	0.010	0.03	0.29	0.001	0.01	0.22

◆ 强迫振荡IMF提取



◆ 单通道分解对比



◆ 计算效率对比

算法	EMD	MEMD
计算时间/s	49.0651	19.8179s

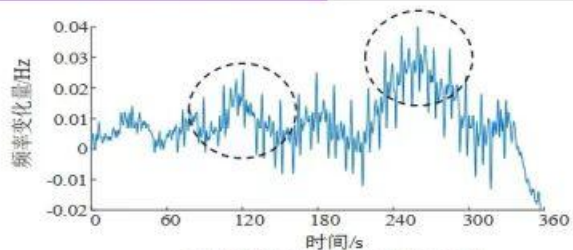
- ✓ 所提方法可对多通道量测信息进行同步分解, 进而有效提取振荡分量
- ✓ 相较单通道方法计算效率更高

二、强迫振荡分量提取

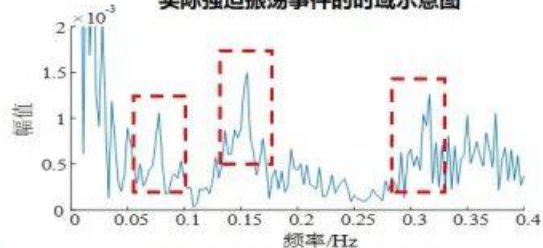
【强迫振荡分量的自适应时-频域能量提取方法】

- 电力系统强迫振荡模式呈现**时变特征**和**多模态特征**。

实际强迫振荡事件

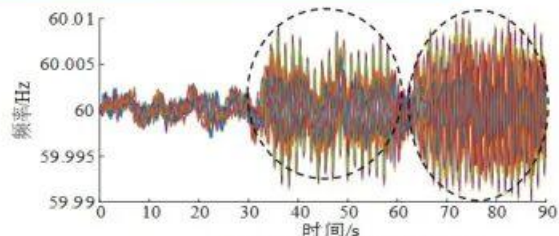


实际强迫振荡事件的时域示意图

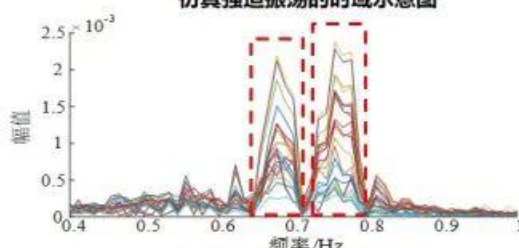


实际强迫振荡事件的频域示意图

实际系统的强迫振荡时域仿真



仿真强迫振荡的时域示意图



仿真强迫振荡的频域示意图

关键技术：准确辨识**强迫振荡频率时变特征**，并提取出各量测信息中**隐含的多个强迫振荡分量**。

【强迫振荡分量的自适应时-频域能量提取方法】

- 利用**时-频分析技术**和**自适应时-频域能量阈值**提取强迫振荡分量

强迫振荡分量自适应提取方法

◆ 振荡分量提取方法

- 通过**时-频分析技术**将时域量测信息扩展至**时间-频率**二维空间
- 构建**多通道时-频系数矩阵**



- 计算节点的**时-频域能量**及自适应**时-频域能量阈值**
- 在时-频域中**追踪强迫振荡模式**

◆ 多通道时频系数矩阵

$$T_{D_j}(n, m) = |T_{\Delta P_v}(n, m)| + |T_{\Delta Q_v}(n, m)| \\ + |T_{\Delta I_f}(n, m)| + |T_{\Delta U_j}(n, m)|$$

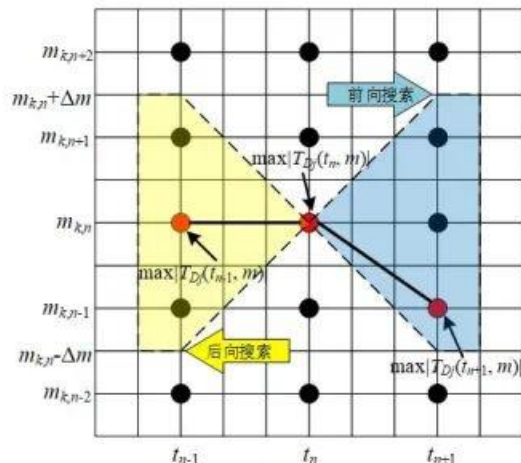
◆ 振荡频率 k 处的时-频域能量:

$$E_j(\eta_k) = \sum_{n=1}^N |T_{D_j}(n, k)|$$

◆ 节点的时-频域能量阈值:

$$\begin{cases} e_j^0(n) = Q_g(|T_{D_j}(n)|_m) \\ E_j^0 = \sum_{n=1}^N e_j^0(n) \end{cases}$$

振荡分量搜索过程

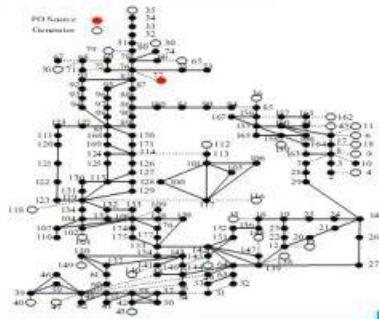


强迫振荡分量时-频域搜索示意图

【强迫振荡分量的自适应时-频域能量提取方法】

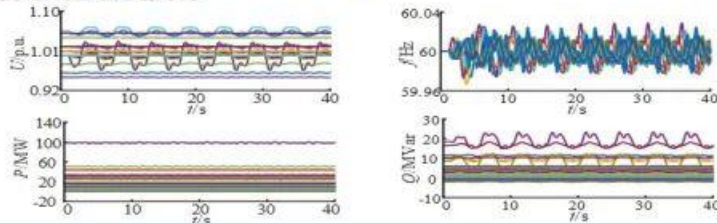
算例分析

◆ WECC-179 测试系统

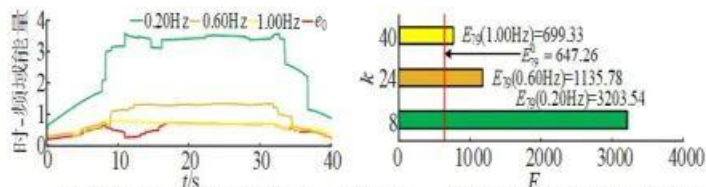


- ✓ $S_B=100\text{MVA}$;
- ✓ 所有负载均采用**恒定MVA模型**;
- ✓ 其他发电机均采用**GENCLS模型**;
- ✓ 采样时间: 40s;
- ✓ 采样频率: 30Hz;
- ✓ 向发电机G79的调速器注入包含0.2、0.6、1 Hz等多次谐波的周期性方波。

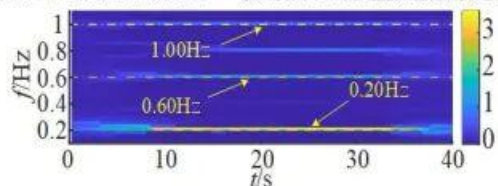
◆ 各电气量仿真曲线



◆ 强迫振荡分量提取结果



发电机G79的时-频域能量 发电机G79的各振荡频率时频域能量对比



发电机G79的多通道时-频系数矩阵

- ✓ 所提方法可**有效辨识振荡模式的时变和多模态特征**, **准确提取出强迫振荡分量**。

汇报提纲

一、研究背景

二、广域量测信息中强迫振荡分量提取

三、数据驱动的强迫振荡源定位

四、强迫振荡源定位性能提升

五、结论与展望

【强迫振荡源时域定位方法】

- 采用模态分解所得IMF分量直接计算耗散能量流

时域耗散能量流

- 构建量测信息矩阵

$$X_j = \begin{bmatrix} \Delta \ln U_j(1) & \Delta f_j(1) & \Delta P_{ij}(1) & \Delta Q_{ij}(1) \\ \Delta \ln U_j(2) & \Delta f_j(2) & \Delta P_{ij}(2) & \Delta Q_{ij}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta \ln U_j(n) & \Delta f_j(n) & \Delta P_{ij}(n) & \Delta Q_{ij}(n) \end{bmatrix}$$

- 采用多元经验模态分解

$$X_j = \sum_{k=1}^m X_{j,\Delta F,k} + r$$

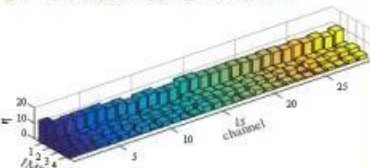
$$= \sum_{k=1}^m \begin{bmatrix} \Delta \ln U_{j,\Delta F,k}(1) & \Delta f_{j,\Delta F,k}(1) & \Delta P_{ij,\Delta F,k}(1) & \Delta Q_{ij,\Delta F,k}(1) \\ \Delta \ln U_{j,\Delta F,k}(2) & \Delta f_{j,\Delta F,k}(2) & \Delta P_{ij,\Delta F,k}(2) & \Delta Q_{ij,\Delta F,k}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta \ln U_{j,\Delta F,k}(n) & \Delta f_{j,\Delta F,k}(n) & \Delta P_{ij,\Delta F,k}(n) & \Delta Q_{ij,\Delta F,k}(n) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} r_{j,\Delta \ln U}(1) & r_{j,\Delta f}(1) & r_{j,\Delta P}(1) & r_{j,\Delta Q}(1) \\ r_{j,\Delta \ln U}(2) & r_{j,\Delta f}(2) & r_{j,\Delta P}(2) & r_{j,\Delta Q}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{j,\Delta \ln U}(n) & r_{j,\Delta f}(n) & r_{j,\Delta P}(n) & r_{j,\Delta Q}(n) \end{bmatrix}$$

- 借助Teager能量提取强迫振荡IMF分量

$$E_m = \sum_{d=1}^T \psi_m(d)$$

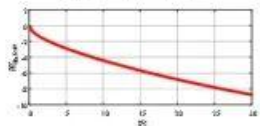
$$\eta_m = \frac{E_m}{\sum_{l=1}^m E_l} \times 100\%$$



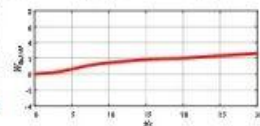
提取示意图

- 基于MEMD的时域DEF计算

$$W_{\Phi_i, \Delta F, m} = \int \Delta P_{ij, \Delta F, m} 2\pi \Delta f_{i, \Delta F, m} dt + \Delta Q_{ij, \Delta F, m} d(\Delta \ln U_{i, \Delta F, m})$$

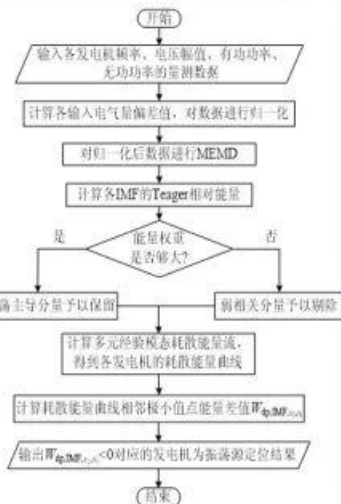


强迫振荡源



非强迫振荡源

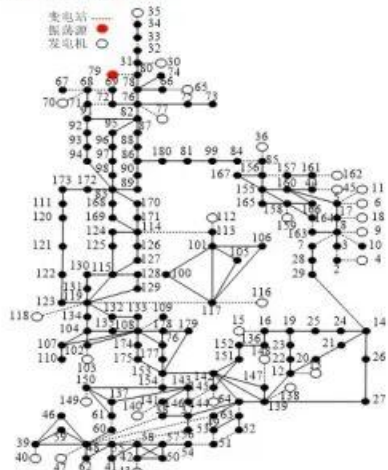
算法流程



【强迫振荡源时域定位方法】

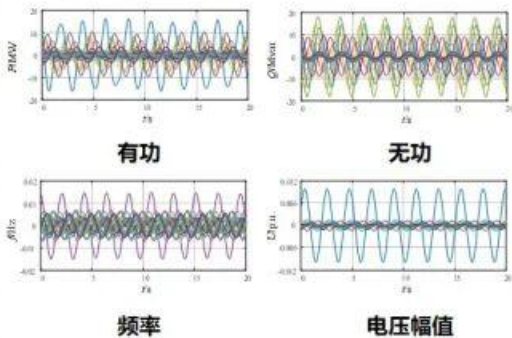
算例分析

◆ 测试系统模型

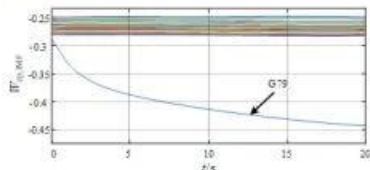


- ✓ 向发电机G79励磁系统持续注入振荡频率为0.46Hz的正弦信号
- ✓ 采样频率：30Hz

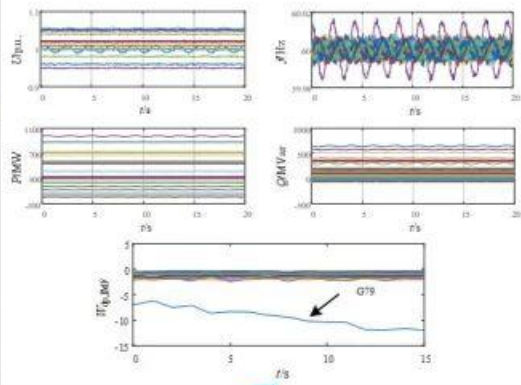
◆ 强迫振荡IMF分量提取



◆ 定位结果



◆ 鲁棒性分析



✓ 所提方法可准确提取出量测信息中的强迫振荡时域IMF分量，进而定位强迫振荡源

【强迫振荡源频域定位方法】

- 根据Parseval定理，将传统耗散能量流进一步推广至频域，**提高定位效率**

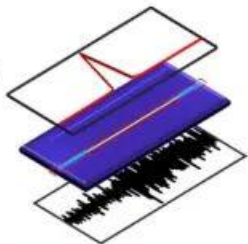
频域耗散能量谱推导

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \Delta f_i(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \Delta f_i^*(t) dt$$

$$\Delta f_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta f}(\tau, F) g(t-\tau) e^{j2\pi F \tau} d\tau dF$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \Delta f_i(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \Delta f_i^*(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta f}^*(\tau, F) g^*(t-\tau) e^{-j2\pi F \tau} d\tau dF \right)^* dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta P}^*(\tau, F) d\tau dF \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) g^*(t-\tau) e^{-j2\pi F \tau} dt \end{aligned}$$

Parseval
定理
STFT
WAMS



$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \Delta f_i(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta P}(\tau, F) S_{\Delta f}^*(\tau, F) d\tau dF \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta P}(\tau, F) S_{\Delta f}^*(\tau, F) d\tau dF \end{aligned}$$

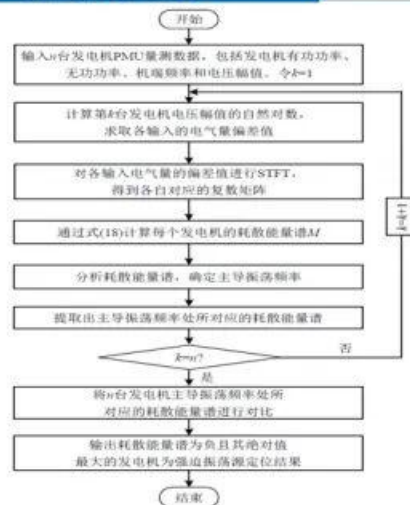
$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta Q_i(t) \Delta \dot{V}_i(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta Q_i(t) \Delta \dot{V}_i^*(t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \Delta Q_i(t) \left(\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta \dot{V}}(\tau, F) g(t-\tau) e^{j2\pi F \tau} d\tau dF \right)^* dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta \dot{V}}^*(\tau, F) d\tau dF \int_{-\infty}^{\infty} \Delta Q_i(t) g^*(t-\tau) e^{-j2\pi F \tau} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta Q}(\tau, F) S_{\Delta \dot{V}}^*(\tau, F) d\tau dF \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\Delta Q}(\tau, F) S_{\Delta \dot{V}}^*(\tau, F) d\tau dF \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta P_i(t) \Delta f_i(t) dt &= \int_{-\infty}^{\infty} X_{\Delta P}^*(F) X_{\Delta f}(F) dF \\ &= \int_0^{\infty} X_{\Delta P}^*(F) X_{\Delta f}(F) dF + \int_0^{\infty} X_{\Delta P}(F) X_{\Delta f}^*(F) dF \end{aligned}$$

频域耗散能量谱

- ✓ 在频域直接估计强迫振荡频率，定位强迫振荡源

频域定位流程

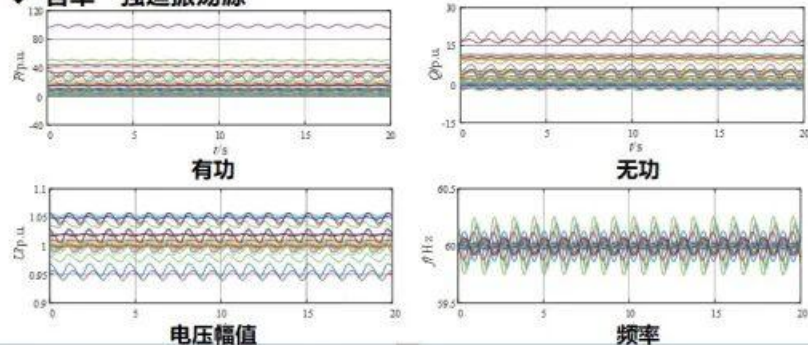


基于耗散能量谱的强迫振荡源定位

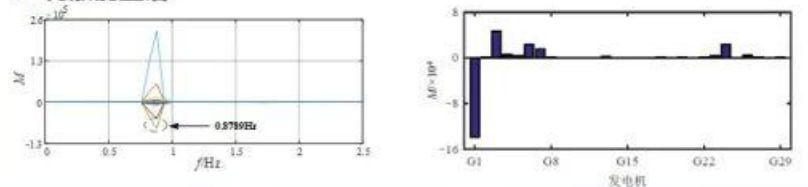
【强迫振荡源频域定位方法】

算例分析

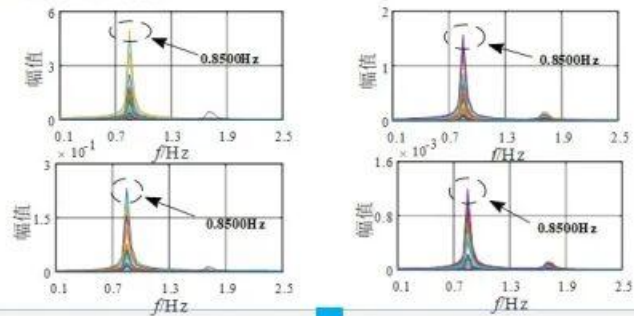
◆ 含单一强迫振荡源



◆ 耗散能量谱



◆ 频谱估计结果



- ✓ 各发电机的耗散能量谱均在**0.8789Hz**频率处出现峰/谷值。
- ✓ 发电机**G1**在振荡频率0.8789Hz处的耗散能量谱为负且绝对值最大，定位出强迫振荡源。

【强迫振荡源时频域定位方法】

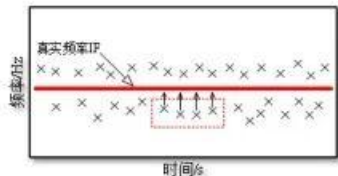
- 借助同步压缩变换(SST)技术, 对频域定位方法做进一步扩展, 提升强迫振荡频率估计精度。

同步压缩变换

◆ 时频域变换 $G_{\Delta P_j}(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(u-t) \Delta P_j(u) e^{-i\omega(u-t)} du$

◆ 瞬时频率估计 $\hat{\omega}(t, \omega) = \frac{1}{iG(t, \omega)} \frac{\partial G(t, \omega)}{\partial t}$

◆ 同步压缩 $T_{\Delta P_j}(t, \eta) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_{\Delta P_j}(t, \omega) \delta(\eta - \hat{\omega}(t, \omega)) d\omega$



同步压缩变换示意图

与频域耗散能量谱的结合

- ◆ 基于同步压缩变换的耗散能量谱

$$M_{j,CWT}^D(c) = \frac{2\pi}{C_p} \int \Re_{\Delta P}(c_r) \Re_{\Delta P}^*(c_r) \frac{dc_r}{c_r^2} + \frac{1}{C_p} \int \Re_{\Delta P}(c_r) \Re_{\Delta P_{inV}}^*(c_r) \frac{dc_r}{c_r^2}$$

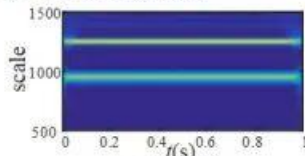
$$M_{j,SWT}^D = \frac{2\pi}{\Delta^2 \omega C_p} \left(\int_{t_{inV}}^{t_{out}} \Re_{\Delta P}(c_r) \Delta \omega \frac{dc_r}{c_r} \right) \times \left(\int_{t_{inV}}^{t_{out}} \Re_{\Delta P}^*(c_r) \Delta \omega \frac{dc_r}{c_r} \right)$$

$$+ \frac{1}{\Delta^2 \omega C_p} \left(\int_{t_{inV}}^{t_{out}} \Re_{\Delta P}(c_r) \Delta \omega \frac{dc_r}{c_r} \right) \times \left(\int_{t_{inV}}^{t_{out}} \Re_{\Delta P_{inV}}^*(c_r) \Delta \omega \frac{dc_r}{c_r} \right)$$

$$= \frac{1}{\Delta^2 \omega C_p} (2\pi T_{\Delta P}(\omega_k) I_{\Delta P}^*(\omega_k) + T_{\Delta P}(\omega_k) I_{\Delta P_{inV}}^*(\omega_k))$$

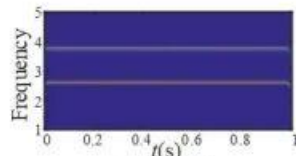
$$= \frac{1}{\Delta^2 \omega C_p} 2\pi \varphi_{\Delta P, \Delta P_{inV}}(\omega_k) + \varphi_{\Delta P, \Delta P_{inV}}(\omega_k)$$

- ◆ 振荡频率估计精度提升



压缩前频率

SST

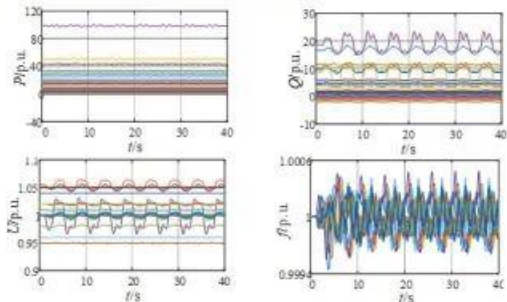


压缩后频率

【强迫振荡源频域定位方法】

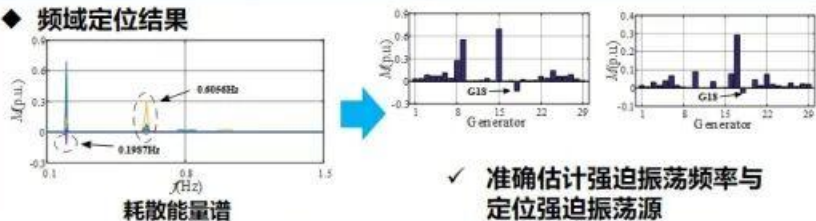
算例分析

◆ 强迫振荡频率含高次谐波

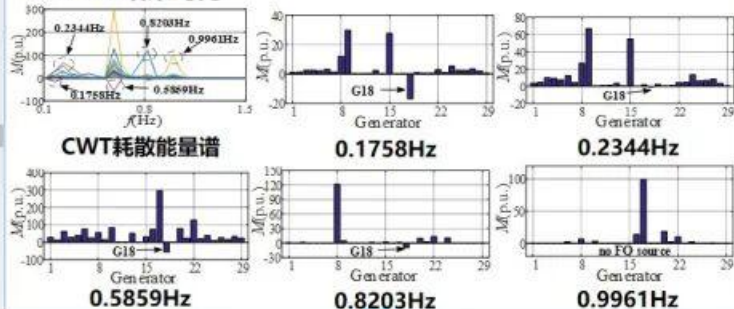


- ✓ 强迫振荡频率为**0.2Hz**, 且包含**0.6Hz, 1Hz**等频率的高次谐波
- ✓ 强迫振荡源为**G18**

◆ 频域定位结果



◆ CWT结果对比

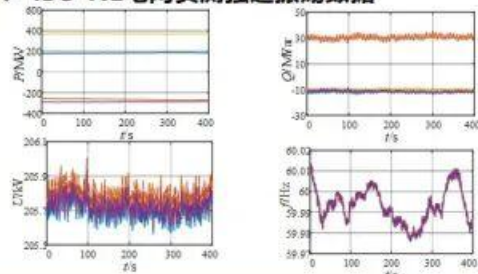


- ✓ 所提方法对含**多次谐波**的强迫振荡频率具有较好的估计效果, 可准确定位强迫振荡源。
- ✓ 相较CWT方法, 所提同步压缩方法估计的强迫振荡频率**精度更高**。

【强迫振荡源频域定位方法】

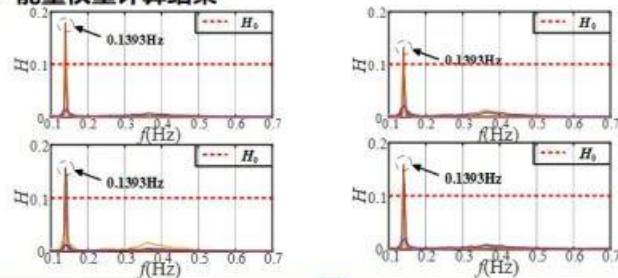
算例分析

◆ ISO-NE电网实测强迫振荡数据

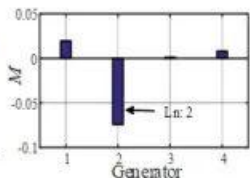
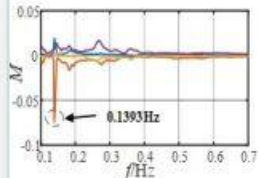


- ✓ 振荡频率为**0.14Hz**
- ✓ 与线路Ln2径向连接的发电厂为强迫振荡源

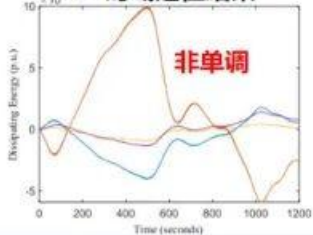
◆ 能量权重计算结果



◆ 频域定位结果



◆ 时域定位结果



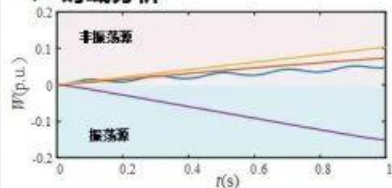
- ✓ 传统时域方法计算的DEF呈现**非单调**趋势，无法定位强迫振荡源。
- ✓ 所提方法可在频域直接**估计强迫振荡频率**进而定位强迫振荡源。

【强迫振荡源时-频域定位方法】

- 借助时频分析技术将耗散能量流扩展至**时-频域**空间

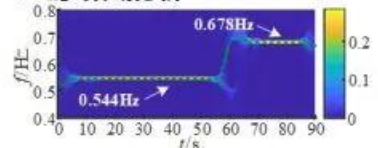
时频分析

◆ 时域分析



- 需重构时域分量
- 难以分析时变强迫振荡

◆ 时-频域分析



- 可同时表征强迫振荡分量的**时域特性**与**频域特性**

$$T_{\Delta p} = \begin{bmatrix} T_{\Delta p}(\omega_1, \tau) \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau) \\ M \\ T_{\Delta p}(\omega_1, \tau) \\ M \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_n) \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_n) \\ M & M & O & M \\ T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_n) \\ M & M & O & M \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_n) \end{bmatrix}$$

时域分量

频域分量

$$T_{\Delta p} = \begin{bmatrix} T_{\Delta p}(\omega_1, \tau) \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau) \\ M \\ T_{\Delta p}(\omega_1, \tau) \\ M \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_n) \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_n) \\ M & M & O & M \\ T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_1, \tau_n) \\ M & M & O & M \\ T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_1) & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_2) & L & T_{\Delta p}(\omega_2, \tau_n) \end{bmatrix}$$

借助时频能量筛选各采样点对应的强迫振荡时频系数

时-频域耗散能量流

时域 $W_{\Delta p} = \int (2\pi\Delta P_{ij}\Delta f_{ij} dt + \Delta Q_{ij}d(\Delta \ln U_{ij}))$

推广

时-频域 $E_{j,CWT}^D = \frac{2\pi}{\Delta^2 \omega C_p} \iint (\Re_{\Delta p}(c, \tau) \Re_{\Delta p}^*(c, \tau)) \frac{dc d\tau}{c^2} + \frac{1}{C_p} \iint (\Re_{\Delta Q}(c, \tau) \Re_{\Delta Q}^*(c, \tau)) \frac{dc d\tau}{c^2}$

$$E_{j,CWT}^D = \frac{2\pi}{\Delta^2 \omega C_p} \left[\int_{t_{-n}}^{t_{+n}} \Re_{\Delta p}(c, \tau) \Delta \omega \frac{dc}{c} \right] \times \left[\int_{t_{-n}}^{t_{+n}} \Re_{\Delta p}^*(c, \tau) \Delta \omega \frac{dc}{c} \right] d\tau + \frac{1}{\Delta^2 \omega C_p} \left[\int_{t_{-n}}^{t_{+n}} \Re_{\Delta Q}(c, \tau) \Delta \omega \frac{dc}{c} \right] \times \left[\int_{t_{-n}}^{t_{+n}} \Re_{\Delta Q}^*(c, \tau) \Delta \omega \frac{dc}{c} \right] d\tau$$

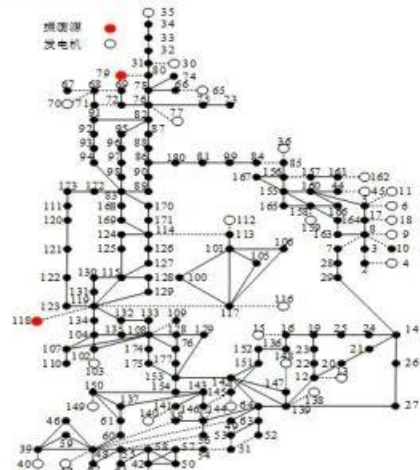
$$= \frac{2\pi}{\Delta^2 \omega C_p} \int (T_{\Delta p}(\omega_1, \tau) T_{\Delta p}^*(\omega_1, \tau)) d\tau + \frac{1}{\Delta^2 \omega C_p} \int (T_{\Delta Q}(\omega_1, \tau) T_{\Delta Q}^*(\omega_1, \tau)) d\tau$$

$$= \frac{1}{\Delta^2 \omega C_p} \int (2\pi \Im_{\Delta p, \Delta p}(\omega_1, \tau) + \Im_{\Delta Q, \Delta Q}(\omega_1, \tau)) d\tau$$

【强迫振荡源时-频域定位方法】

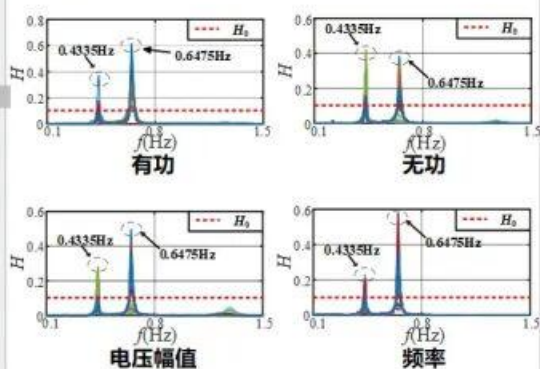
算例分析-多振荡源场景

◆ 测试系统模型



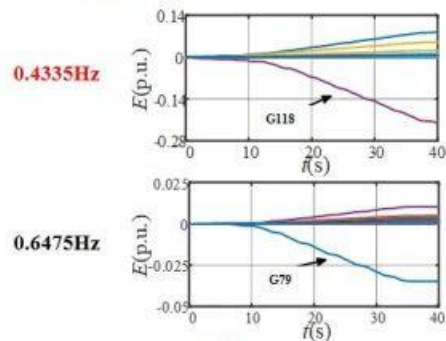
- ✓ 向发电机G79和G118调速系统持续注入振荡频率为0.65Hz和0.43Hz的正弦信号
- ✓ 采样频率：30Hz

◆ 能量权重计算



- ✓ 辨识出两组频率高于检测阈值
- ✓ 所提方法有效辨识出0.4335Hz和0.6475Hz的强迫振荡频率

◆ 定位结果

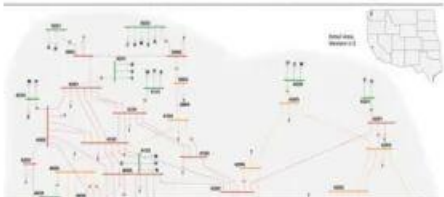


- ✓ 发电机G118和G79分别在各自强迫振荡频率处的时-频域耗散能量为负
- ✓ 有效定位**双振荡源**

【强迫振荡源时-频域定位方法】

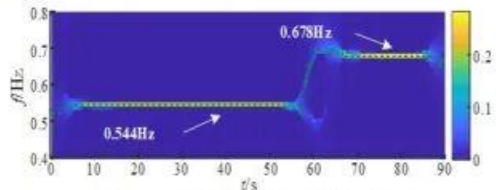
算例分析-时变振荡场景

◆ WECC-240测试系统部分拓扑



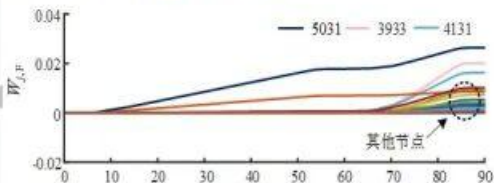
- ✓ 向节点4231所连发电机的调速系统持续注入振荡频率为0.54Hz的正弦信号，60秒后正弦信号的振荡频率改变为0.68Hz。

◆ 强迫振荡频率辨识

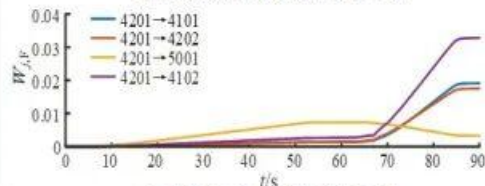


节点5031的强迫振荡频率辨识结果

◆ 时-频域耗散能量流



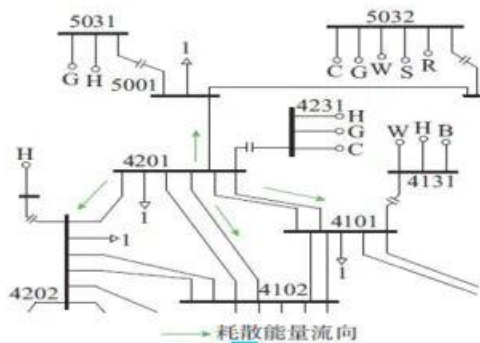
各节点的时-频域耗散能量流



节点间的时-频域耗散能量流

- ✓ 有效辨识出强迫振荡频率的时变特征；
- ✓ 所提定位方法在系统可观性受限情况下，可有效辨识出5031节点与振荡源相邻。

◆ 定位结果



- ✓ 有效提取时变强迫振荡模式；
- ✓ 节点4201持续向相邻节点扩散振荡能量，结合拓扑可将节点4231所连发电机定位为振荡源。

汇报提纲

一、研究背景

二、广域量测信息中强迫振荡分量提取

三、数据驱动的强迫振荡源定位

四、强迫振荡源定位性能提升

五、结论与展望

【基于多元变分模态分解的强迫振荡源定位】

多元变分模态分解(MVMD)

◆ 多元变分约束模型

$$\min_{\{IMF_{k,n}\}_{k,n}} \sum_k \sum_n \left\| \beta_k \left[IMF_{k,n}^*(t) e^{-j\omega_k t} \right] \right\|_2^2$$

$$s.t. \sum_k IMF_{k,n}(t) = x_n(t) \quad n=1, 2, \dots, N$$

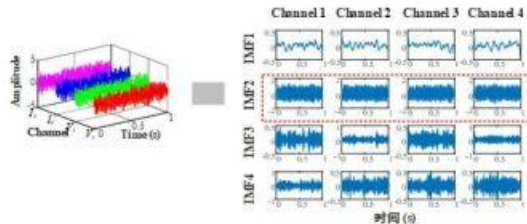
$$L(\{IMF_{k,n}\}, \{\omega_k\}, \lambda_n) = \alpha \sum_k \sum_n \left\| \beta_k \left[IMF_{k,n}^*(t) e^{-j\omega_k t} \right] \right\|_2^2$$

$$- \sum_n \left\| x_n(t) - \sum_k IMF_{k,n}(t) \right\|_2^2 + \sum_n \left(\lambda_n (x_n(t) - \sum_k IMF_{k,n}(t)) \right)$$

◆ 频域模态

$$\mathfrak{R}_{k,n}^{-1}(\omega) = \frac{\mathfrak{R}_n(\omega) - \sum_{i \neq k} \mathfrak{R}_{i,n}(\omega) + \frac{\lambda_n(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2}$$

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\sum_n \int_0^{\omega_n} \omega |\mathfrak{R}_{k,n}(\omega)|^2 d\omega}{\sum_n \int_0^{\omega_n} |\mathfrak{R}_{k,n}(\omega)|^2 d\omega}$$

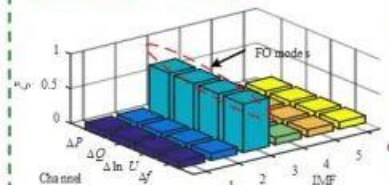


强迫振荡分量自适应提取与定位

多通道量测信息矩阵构建

$$X_j = \begin{bmatrix} x_{j,\Delta P} \\ x_{j,\Delta Q} \\ x_{j,\Delta \ln U} \\ x_{j,\Delta f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_j(1) & \Delta Q_j(1) & \Delta \ln U_j(1) & \Delta f_j(1) \\ \Delta P_j(2) & \Delta Q_j(2) & \Delta \ln U_j(2) & \Delta f_j(2) \\ M & M & M & M \\ \Delta P_j(\tau) & \Delta Q_j(\tau) & \Delta \ln U_j(\tau) & \Delta f_j(\tau) \end{bmatrix}$$

强迫振荡IMF提取



平均能量函数

$$\mu_{k,n} = \sum_{l=1}^2 \mathfrak{R}_{l,n}^2(t)$$

能量权重

$$\eta_{k,n} = \frac{\mu_{k,n}}{\sum_{l=1}^K \mu_{l,n}} \times 100\%$$

MVMD同步自适应分解

变分约束模型

$$\min_{\{IMF_{k,n}\}_{k,n}} \sum_k \sum_n \left\| \beta_k \left[IMF_{k,n}^*(t) e^{-j\omega_k t} \right] \right\|_2^2$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{k=1}^K IMF_{k,\Delta P}(t) = x_{\Delta P}(t), & \sum_{k=1}^K IMF_{k,\Delta Q}(t) = x_{\Delta Q}(t) \\ \sum_{k=1}^K IMF_{k,\Delta \ln U}(t) = x_{\Delta \ln U}(t), & \sum_{k=1}^K IMF_{k,\Delta f}(t) = x_{\Delta f}(t) \end{cases}$$

频域模态矩阵

$$\mathfrak{R}_j = \begin{bmatrix} \mathfrak{R}_{j,\Delta P}(\omega_1) & \mathfrak{R}_{j,\Delta Q}(\omega_1) & \mathfrak{R}_{j,\Delta \ln U}(\omega_1) & \mathfrak{R}_{j,\Delta f}(\omega_1) \\ \mathfrak{R}_{j,\Delta P}(\omega_2) & \mathfrak{R}_{j,\Delta Q}(\omega_2) & \mathfrak{R}_{j,\Delta \ln U}(\omega_2) & \mathfrak{R}_{j,\Delta f}(\omega_2) \\ M & M & M & M \\ \mathfrak{R}_{j,\Delta P}(\omega_k) & \mathfrak{R}_{j,\Delta Q}(\omega_k) & \mathfrak{R}_{j,\Delta \ln U}(\omega_k) & \mathfrak{R}_{j,\Delta f}(\omega_k) \\ M & M & M & M \\ \mathfrak{R}_{j,\Delta P}(\omega_L) & \mathfrak{R}_{j,\Delta Q}(\omega_L) & \mathfrak{R}_{j,\Delta \ln U}(\omega_L) & \mathfrak{R}_{j,\Delta f}(\omega_L) \end{bmatrix}$$

$$+ [\beta_{j,\Delta P}(\omega) \quad \beta_{j,\Delta Q}(\omega) \quad \beta_{j,\Delta \ln U}(\omega) \quad \beta_{j,\Delta f}(\omega)]$$

基于MVMD能量流计算

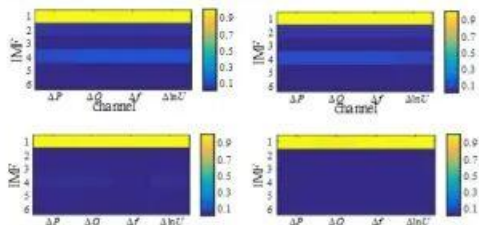
$$E_j = E_{j,\Delta P} + E_{j,\Delta Q}$$

$$= \int (2\pi IMF_{j,\Delta P} IMF_{j,\Delta Q}^* df + IMF_{j,\Delta Q} d(IMF_{j,\Delta \ln U}))$$

【基于多元变分模态分解的强迫振荡源定位】

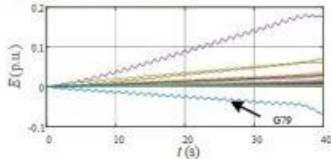
算例分析

◆ WECC179节点系统数据



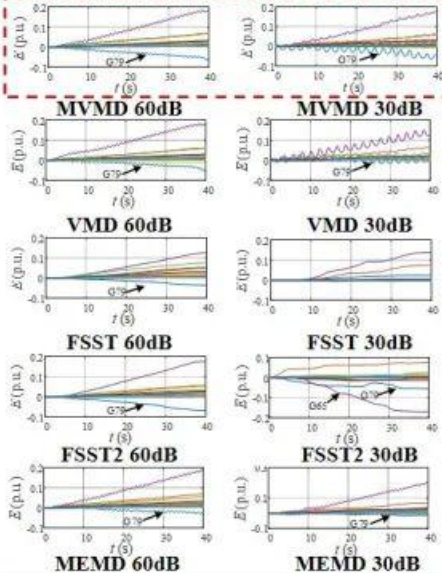
IMF1能量权重最高，为强迫振荡IMF分量

◆ 强迫振荡源定位结果



✓ G79基于MVMD的耗散能量流趋势向下，为强迫振荡源

◆ 鲁棒性分析



◆ 计算效率对比

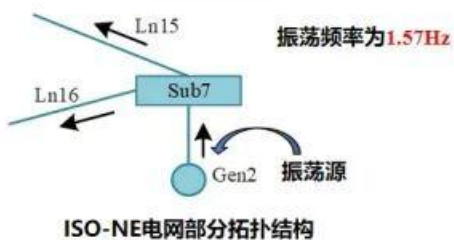
方法	时间				
	0-10	0-20	0-30	0-40	20-40
MVMD	2.586	3.167	3.847	6.313	3.531
VMD	18.249	25.297	34.825	55.891	27.221
FSST	4.217	5.988	7.572	11.254	6.012
FSST2	5.879	7.580	9.192	14.845	7.883
MEMD	8.511	11.235	14.964	19.818	11.891

- ✓ 所提方法能够准确定位强迫振荡源且具有较强的鲁棒性
- ✓ 所提方法对量测信息进行同步分解，具有较高的**计算效率**。

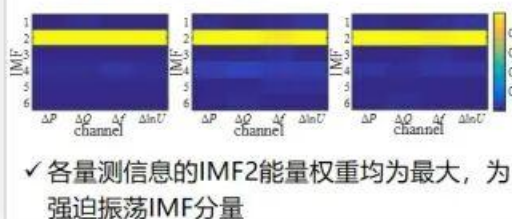
【基于多元变分模态分解的强迫振荡源定位】

算例分析

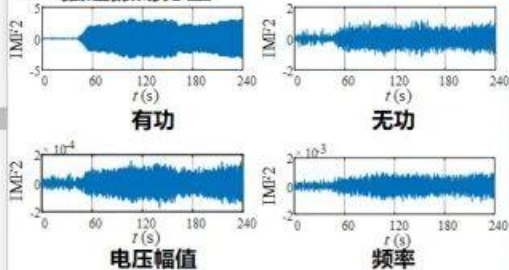
◆ ISO-NE电网实测数据



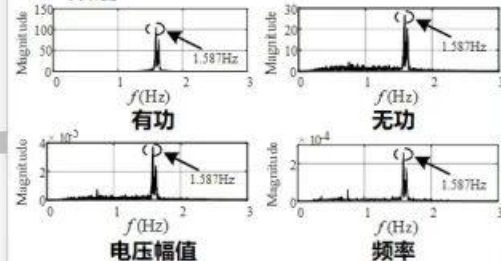
◆ 能量权重计算结果



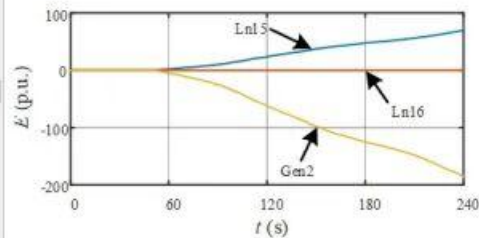
◆ 强迫振荡分量



◆ 频谱



◆ 定位结果



- ✓ 所提方法能可实现量测信息的同步自适应分解，准确提取出强迫振荡分量
- ✓ 所提方法对含噪声的实测数据具有较好的鲁棒性。

【强迫振荡源多通道时-频域定位】

同步压缩变换的多元扩展

◆ 同步压缩变换

$$T(\omega, b) = \frac{1}{\Delta\omega} \sum_{a_c, \frac{1}{2}|\omega(a_c, b) - \omega| \leq \Delta\omega/2} \mathfrak{F}(a_c, b) a_c^{-3/2} \Delta a_c$$

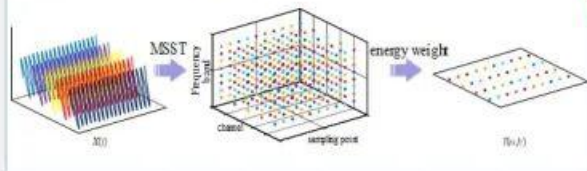
◆ 多通道扩展

瞬时频率

$$\Omega_k(b) = \frac{\sum_{\omega \in \Omega_k} |T(\omega, b)|^2 \omega}{\sum_{\omega \in \Omega_k} |T(\omega, b)|^2}$$

$$\Omega_k^{mult}(b) = \frac{\sum_{j=1}^J (A'_k(b))^2 \Omega'_k(b)}{\sum_{j=1}^J (A'_k(b))^2}$$

◆ 多通道同步分解



瞬时幅值

$$A_k(b) = \sqrt{\sum_{\omega \in \Omega_k} |T(\omega, b)|^2}$$

$$A_k^{mult}(b) = \sqrt{\sum_{j=1}^J (A'_k(b))^2}$$

基于MSST的时-频域DEF

◆ 计算MSST系数矩阵

$$T_{j,\delta}^{mult}(b) = \begin{bmatrix} T_{j,\Delta\omega L}(\omega_1, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_1, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_2, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_3, b) \\ T_{j,\Delta\omega L}(\omega_2, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_2, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_3, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_4, b) \\ M & M & M & M \\ T_{j,\Delta\omega L}(\omega_3, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_3, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_4, b) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_5, b) \end{bmatrix}$$

◆ 能量权重矩阵

$$\zeta_j^{mult} = \begin{bmatrix} \zeta_{j,\Delta\omega L}(1) & \zeta_{j,\Delta\omega}(1) & \zeta_{j,\Delta\omega}(1) & \zeta_{j,\Delta\omega}(1) \\ \zeta_{j,\Delta\omega L}(2) & \zeta_{j,\Delta\omega}(2) & \zeta_{j,\Delta\omega}(2) & \zeta_{j,\Delta\omega}(2) \\ M & M & M & M \\ \zeta_{j,\Delta\omega L}(k) & \zeta_{j,\Delta\omega}(k) & \zeta_{j,\Delta\omega}(k) & \zeta_{j,\Delta\omega}(k) \end{bmatrix}$$

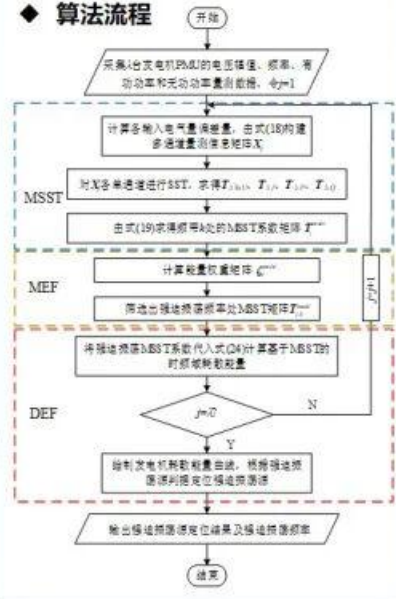
◆ 提取强迫振荡MSST系数

$$T_{j,\delta}^{mult} = \begin{bmatrix} T_{j,\Delta\omega L}(\omega_1, b_1) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_1, b_1) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_2, b_1) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_3, b_1) \\ T_{j,\Delta\omega L}(\omega_1, b_2) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_1, b_2) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_2, b_2) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_3, b_2) \\ M & M & M & M \\ T_{j,\Delta\omega L}(\omega_1, b_n) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_1, b_n) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_2, b_n) & T_{j,\Delta\omega}(\omega_3, b_n) \end{bmatrix}$$

◆ 计算时-频域能量流

$$W_j - W_{j+1} + \frac{4}{C_j} \sum_{\omega} \text{Re} \{ 2\pi r T_{j,\omega}(\omega, \delta) * T_{j,\omega}(\omega, \delta) + T_{j,\omega}(\omega, \delta) * [T_{j,\omega+1}(\omega, \delta) - T_{j,\omega+1}(\omega, \delta - 1)] \}$$

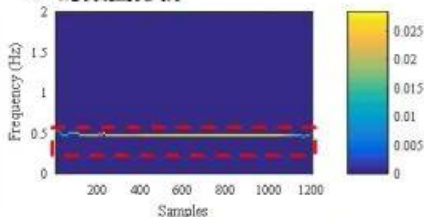
◆ 算法流程



【强迫振荡源多通道时-频域定位】

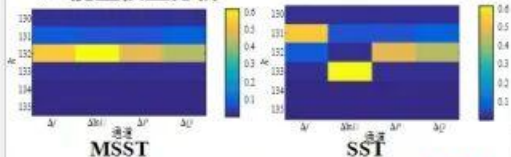
算例分析

◆ 时频图分析



✓ 检测到0.46Hz的强迫振荡分量

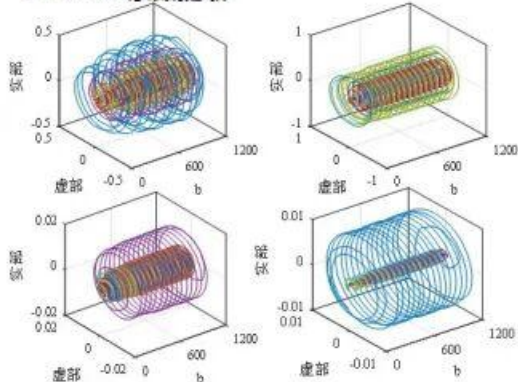
◆ 能量权重分析



✓ MSST: 强迫振荡模式对应频带均为**132**.

✓ SST: 强迫振荡对应频带分别为 **133, 131, 132, 132**

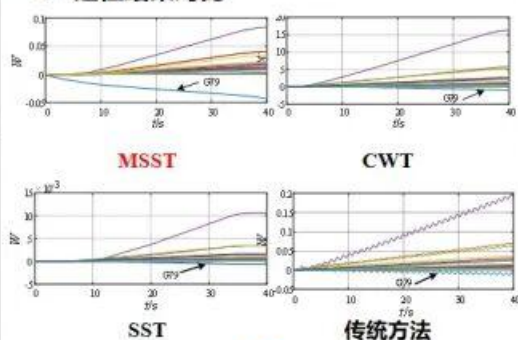
◆ MSST系数提取



◆ 计算效率分析

算法	CWT	SST	MEMD	MSST
计算时间/s	15.5186	13.8923	19.8182	12.3659
提升效果	20.31%	10.99%	37.60%	-

◆ 定位结果对比



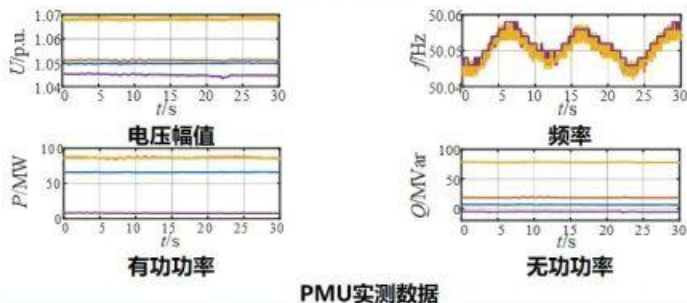
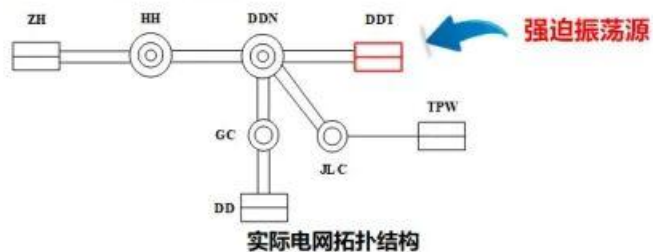
✓ 所提基于MSST的强迫振荡源时-频域定位方法具有较好的**定位精度**，且**计算效率**相较时域定位方法有较大提升

四、强迫振荡源定位性能提升

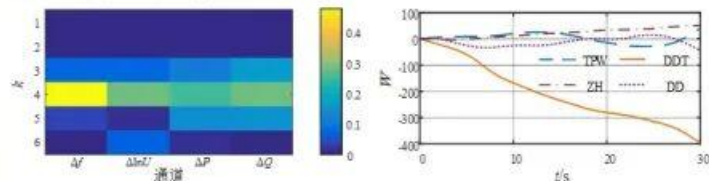
【强迫振荡源多通道时-频域定位】

算例分析

◆ 国内某电网实测数据



◆ 强迫振荡源定位



- ✓ 各电气量均在第4个频带处能量权重最高，表明该频带包含系统主导强迫振荡模式。
- ✓ DDT为强迫振荡源

- ✓ 所提强迫振荡源多通道时-频域定位方法对电力系统**实测数据**具有较好的强迫振荡分量提取效果，并准确定位强迫振荡源。

汇报提纲

一、研究背景

二、广域量测信息中强迫振荡分量提取

三、数据驱动的强迫振荡源定位

四、强迫振荡源定位性能提升

五、结论与展望

【总结】

围绕数据驱动的强迫振荡源定位开展了强迫振荡分量提取、强迫振荡源时-频域与频域定位、强迫振荡源多通道定位性能提升三方面开展了研究：



- 针对强迫振荡分量提取方面，提出了**基于自适应时-频域能量**的强迫振荡分量提取方法，对**时变多模态**强迫振荡具有较好的提取效果；提出了基于**MEMD**的强迫振荡分量提取方法，实现了多通道量测信息振荡分量的**同步**提取。
- 针对强迫振荡源定位方面，将传统时域耗散能量流进一步推广至**时-频域**和**频域**，提出了强迫振荡源时域、时-频域与频域**协同定位**方法，可为强迫振荡分析提供丰富的参考信息。
- 针对强迫振荡源多通道定位性能提升方面，充分计及电力系统**量测信息相关性**，提出了基于**MSST**的强迫振荡源多通道时-频域定位方法，以提升强迫振荡源定位**精度与效率**；提出了基于**MVMD**的强迫振荡源多通道定位方法，具有较强的鲁棒性。

【数据驱动的强迫振荡监测分析平台】

◆ 硬件部分



同步相量量测单元



实时仿真硬件和SEL-3355 数据处理中心

◆ 软件部分



数据驱动的强迫振荡监测分析可视化界面

【展望】



- [1] T. Jiang, B. Liu, G. Liu, *et.al.* Forced Oscillation Source Location of Bulk Power Systems Using Synchrosqueezing Wavelet Transform [J]. IEEE Trans. Power Systems, doi: 10.1109/TPWRS.2024.3351915. (early access)
- [2] T. Jiang, B. Liu, B. Wang, *et.al.* Forced Oscillation Source Location in Power Systems Using MVMD-assisted DEF in TF Plane [J]. IEEE Trans. Power Systems, doi: 10.1109/TPWRS.2024.3375310. (early access)
- [3] 姜涛, 刘博涵, 李雪, 等. 基于多元同步压缩变换的电力系统强迫振荡源定位[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(01): 46-58.
- [4] 姜涛, 高滢, 李雪, 等. 电力系统强迫振荡源定位的耗散能量谱方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(08): 2940-2953.
- [5] 姜涛, 刘博涵, 李雪, 等. 基于多元经验模态分解的电力系统强迫振荡源定位[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8063-8074.
- [6] 姜涛, 刘博涵, 李雪, 等. 基于自适应投影多元经验模态分解的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3527-3538.
- [7] 姜涛, 高滢, 李筱静, 等. 基于小波耗散能量谱的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(07): 1737-1750.
- [8] 姜涛, 叶楠, 李国庆. 电力系统强迫振荡源定位的时-频域耗散能量流方法[J/OL]. 电力系统自动化: 1-19. (网络首发)
- [9] 姜涛, 李孟豪, 李雪, 等. 电力系统强迫振荡源的时频域定位方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(09): 98-106.



谢谢！
请各位专家批评指正！

—— 东北电力大学 姜涛