

基于 EEMD-NE_xT 的低频振荡主导模式工况 在线辨识与预警

汪颂军, 刘涤尘, 廖清芬, 周雨田, 王亚俊, 王乙斐, 赵一婕

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 结合集合经验模式分解(EEMD)和自然激励技术(NE_xT), 基于广域测量系统(WAMS)的动态量测信息, 提出低频振荡主导模式识别方法。该方法借助 EEMD 处理非平稳信号, 利用 EEMD 时空滤波器、互相关系数和信号能量权重筛选出主导模式分量; 通过 NE_xT 求互相关函数, 并利用 Teager 能量算子识别时变幅值和频率, 采用信号能量分析法辨识阻尼比并应用于预警系统。算例仿真结果表明, 所提方法能够实时准确地辨识出系统的主导模式信息, 且无需人工激励并剔除虚假模式, 同时具有较强的抗噪性能。

关键词: 集合经验模式分解; 自然激励技术; 工况模式分析; 低频振荡; 主导模式识别; 稳定性

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.12.019

0 引言

随着全国联网程度的不断加深, 低频振荡日益成为危及电网安全稳定运行的突出问题之一。基于系统日常运行工况下的实测轨迹进行的低频振荡模式在线辨识, 对于低频振荡的在线监测、预警、控制器设计、系统阻尼优化等具有重要意义^[1-3]。

目前对电力系统低频振荡进行分析一般基于系统扰动后的响应轨迹, 常用的方法有傅里叶变换、ARMA 算法、Prony 分析、小波算法、希尔伯特-黄变换(HHT)、旋转不变技术(ESPRIT)等^[4-6], 已有研究证明这些方法均能较准确地辨识出系统的模式信息。但是这类辨识方法均需对系统施加激励, 只能在系统发生振荡后辨识出当时的系统特性, 作出告警, 并不能给出系统正常运行状态下的模式信息, 也无法实现“全天候”监控和真正意义上的预警^[7-8]。近年来基于环境激励的模式辨识研究已在桥梁、建筑、汽轮机、飞机等^[9]领域展开, 电力领域也逐步开展了一些研究: 文献[10]探讨了工况模式分析在低频振荡辨识中的应用, 论述了电力系统低频振荡和一般振动力学数学模型的相似性; 文献[7]通过系统建模证明了负荷波动作为激励信号的可行性, 以上研究为工况模式分析在电力系统的应用做好了铺垫。自然激励技术 NE_xT(Natural Excitation Technique)^[9, 11-12]是工况模式分析的有效方法, 它可以避免传统模式

辨识人工激励给电力系统带来的伤害, 实现系统在工况下的在线模式识别, 其在电力领域仅在文献[13]中有应用, 值得更进一步的研究。

集合经验模式分解 EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition)^[14-15]是经验模式分解 EMD(Empirical Mode Decomposition)的发展, 既继承了 EMD 的优点, 同时通过向原始信号添加白噪声改善了模式混叠问题。它是一种自适应的分析方法, 适合处理工程中的非线性、非平稳信号。

基于此, 本文将 NE_xT 与 EEMD 结合, 提出一种适合于工况下的低频振荡主导模式辨识方法。首先通过 EEMD 将工况下的实测时变信号分解为若干个单自由度的本征模式, 凭借 EEMD 时空滤波器、互相关系数和能量权重比筛选出真实主导模式分量, 然后通过 NE_xT 求互相关函数以代替传统的脉冲响应, 至此就实现了工况下把非平稳的多自由度系统的模式辨识问题转化为单自由度系统的脉冲响应辨识问题, 最后对互相关函数分别通过 Teager 能量算子 TEO(Teager Energy Operator)求出模式幅值和频率、能量分析求阻尼比、峰值法求相位。

1 EEMD

1.1 EEMD 原理

为了改善 EMD 出现的模式混叠现象, Wu Zhaohua 等提出了 EEMD 方法, 其本质是一种叠加高斯白噪声的多次 EMD。下面介绍 EEMD 的步骤。

a. 产生 N 条随机正态分布的白噪声 $n_i(t)$ 分别加入到原始信号 $x(t)$ 中, 得每次加噪后的信号 $x_i(t)$ 为:

$$x_i(t) = x(t) + n_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

b. 对每条加噪后的信号 $x_i(t)$ 进行 EMD, 得:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^M c_{ij}(t) + r_i(t) \quad (2)$$

收稿日期: 2013-09-25; 修回日期: 2014-10-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA-05A119); 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG029-2012)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A119) and State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG029-2012)

其中, $c_{ij}(t)$ 为第 i 次加入高斯白噪声后分解得到的第 j 个本征模式函数(IMF)分量; $r_i(t)$ 为对 $x_i(t)$ 进行 EMD 后的余项。

c. 将 N 组分解结果中对应的 IMF 分量求均值, 则:

$$c_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ij}(t) \quad (3)$$

$$r(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(t) \quad (4)$$

其中, $c_j(t)$ 为对原始信号进行 EEMD 得到的第 j 个 IMF 分量; $r(t)$ 为余项。

EEMD 算法流程如图 1 所示。

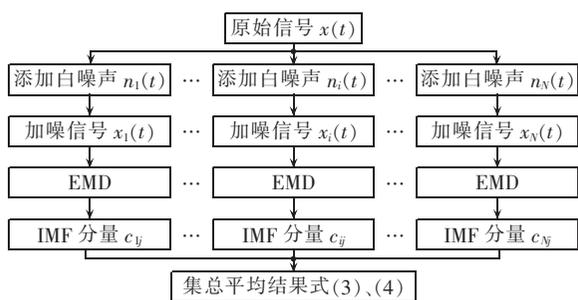


图 1 EEMD 算法流程图

Fig.1 Flowchart of EEMD algorithm

1.2 EEMD 时空滤波器

EEMD 得到的 IMF 分量频率由大到小, 利用这点本文基于 EEMD 构造时空滤波器组(TFB), 其滤波信号为:

$$\hat{x}(t) = \sum_{j=l}^h c_j(t) \quad (5)$$

其中, $\hat{x}(t)$ 为滤波器输出信号; $l, h \in [1, M]$ 。

当 $l=1$ 且 $h < M$ 时, TFB 为高通滤波器; 当 $l > 1$ 且 $h = M$ 时, TFB 为低通滤波器; 当 $1 < l \leq h < M$ 时, TFB 为带通滤波器。

1.3 互相关系数

原始信号经 EEMD 所得的 IMF 分量中常包含一些虚假分量, 而这些虚假分量与原始信号无关且不能反映原始信号的特征, 因此有必要将其辨别出来并予以剔除。基于互相关系数来判断 IMF 分量的真伪是一种行之有效的方法, 通过求取分解后的各 IMF 分量与原始信号的互相关系数, 假定互相关系数很小的对应 IMF 分量为伪分量。设 2 个时间序列 $x(n)$ 、 $y(n)$, 它们的互相关系数 ρ_{xy} 的表达式如式(6)所示。

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n)y^2(n)}} \quad (6)$$

互相关系数只是一个比率, 不是等单位量度, 互相关系数的正负号只表示相关的方向, 绝对值表示相关的程度。

1.4 信号能量权重

电力系统低频振荡大多是多个模式的组合, 其中阻尼比小且振荡幅度大的主导模式特征信息是电力工作者最为关心的。当信噪比足够大时以信号能量作为定性分析指标, 从 EEMD 结果中经过滤波去伪后提取真实模式中能量权重最大的一个 IMF 分量作为主导模式加以分析。

信号 x 的能量表达式为:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} x^2(t) dt \quad (7)$$

其中, t_0, t_1 分别为仿真开始和结束的时刻。

信号能量权重比定义为:

$$\eta(i) = \left[E_f(i) / \sum_{i=1}^m E_f(i) \right] \times 100\% \quad (8)$$

其中, $E_f(i)$ 为真实模式中第 i 个 IMF 分量的能量; m 为真实模式 IMF 分量的总个数。

2 NExT

NExT 是由 JAMES 等提出的一种适合于环境激励的时域模式参数辨识方法, 它的基本思想为: 线性系统在白噪声环境激励下, 结构中 2 点之间响应的互相关函数和脉冲响应函数有相似的表达式, 求得互相关函数之后就可以运用时域模式辨识方法对其进行辨识。

对于自由度为 Q 的线性系统, 于系统 k 点处加激励 $f_k(t)$, 则系统 i 点的响应 $x_{ik}(t)$ 为:

$$x_{ik}(t) = \sum_{r=1}^{2Q} \phi_{ir} a_{kr} \int_{-\infty}^t e^{\lambda_r(t-p)} f_k(p) dp \quad (9)$$

其中, ϕ_{ir} 为第 i 测点的第 r 阶模式振型; a_{kr} 为仅与激励点 k 和模式阶次 r 有关的常数项; λ_r 为系统的第 r 阶特征值。

根据振动模式理论, 当系统的 k 点受到单位脉冲激励时, 则系统 i 点的脉冲响应函数 $h_{ik}(t)$ 为:

$$h_{ik}(t) = \sum_{r=1}^{2Q} \phi_{ir} a_{kr} e^{\lambda_r t} \quad (10)$$

当系统 k 点处受到激励 $f_k(t)$ 时, 系统 i 点和 j 点的响应 $x_{ik}(t)$ 和 $x_{jk}(t)$ 的互相关函数为:

$$R_{ijk}(\tau) = E[x_{ik}(t+\tau)x_{jk}(t)] = \sum_{r=1}^{2Q} \sum_{s=1}^{2Q} \phi_{ir} \phi_{js} a_{kr} a_{ks} \times \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^{t+\tau} e^{\lambda_r(t+\tau-p)} e^{\lambda_s(t-p)} E[f_k(p)f_k(q)] dp dq \quad (11)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示求期望。

假定激励 $f(t)$ 是理想白噪声, 根据相关函数的定义, 则有:

$$E[f_k(p)f_k(q)] = a_k \delta(p-q) \quad (12)$$

其中, δ 为单位脉冲激励; a_k 为仅与激励点 k 有关的常数项。

将式(12)代入式(11)并积分,得:

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{r=1}^{2Q} \sum_{s=1}^{2Q} (\phi_{ir} \phi_{js} a_{kr} a_{ks} a_k) \int_{-\infty}^t e^{\lambda_r(t+\tau-p)} e^{\lambda_s(t-p)} dp \quad (13)$$

对式(13)的积分部分进行计算并化简,得:

$$-\frac{e^{\lambda_r \tau}}{\lambda_r + \lambda_s} = \int_{-\infty}^t e^{\lambda_r(t+\tau-p)} e^{\lambda_s(t-p)} dp \quad (14)$$

将式(14)代入式(13),得:

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{r=1}^{2Q} \sum_{s=1}^{2Q} \phi_{ir} \phi_{js} a_{kr} a_{ks} a_k \left(-\frac{e^{\lambda_r \tau}}{\lambda_r + \lambda_s} \right) \quad (15)$$

对式(15)做进一步的化简,经整理得:

$$R_{ijk}(\tau) = \sum_{r=1}^{2Q} b_{jr} \phi_{ir} e^{\lambda_r \tau} \quad (16)$$

$$b_{jr} = \sum_{s=1}^{2Q} \phi_{js} a_{kr} a_{ks} a_k \left(-\frac{1}{\lambda_r + \lambda_s} \right) \quad (17)$$

其中, b_{jr} 为仅与参考点 j 和模式阶次 r 有关的常数项。

对比式(16)和式(10),可以发现两者的数学表达式在形式上是完全一致的,因此互相关函数具有和系统的脉冲响应函数同样的性质,可与其他模式辨识方法结合起来进行环境激励下的模式识别。

3 低频振荡主导模式识别

3.1 模式识别

3.1.1 Teager 能量算子

Teager 能量算子^[16-18]具有健壮性和快速响应能力,能迅速跟踪信号的幅值和频率。

设幅值和频率均时变的工程信号为:

$$x_n = a_n \cos \phi_n \quad (18)$$

由文献[17]可知信号 x_n 的瞬时数字角频率、实际频率、幅值分别为:

$$\Omega_{in} = \frac{1}{2} \arccos \left[1 - \frac{\psi(x_{n+1} - x_{n-1})}{2\psi(x_n)} \right] \quad (19)$$

$$f_i = \frac{f_s \Omega_{in}}{2\pi} \quad (20)$$

$$|a_n| = \frac{2\psi(x_n)}{\sqrt{\psi(x_{n+1} - x_{n-1})}} \quad (21)$$

EEMD 得到的 IMF 分量频率变化非常小,由于边际效应两端数据存在误差,计算过程中取合适的中间段数据求均值。

3.1.2 能量分析法

信号能量分析法^[19]的原理是基于阻尼耗散能量思想,可将阻尼特性从用半周期能量描述的物理过程中提取出来。

振荡信号 $x(t)$ 的半周期能量定义为:

$$E_i = \int_{t_i}^{t_i+T_d/2} x^2(t) dt \quad (22)$$

其中, t_i 为某一过零点时刻; T_d 为振荡周期。

文献[19]已给出信号 $x(t)$ 的阻尼比 ξ 为:

$$\xi = \frac{C}{\sqrt{4\pi^2 + C^2}} \quad (23)$$

$$C = \ln \frac{E_1 + E_3 + \dots + E_{2N'-1}}{E_2 + E_4 + \dots + E_{2N'}}$$

3.1.3 峰值法

由文献[20]可知,已知频率 f 和阻尼比 ξ 后,相位 θ 为:

$$\theta = 2g\pi + \arcsin \sqrt{1 - \xi^2} - \sqrt{1 - 2\pi f \xi^2} T(j) \quad (24)$$

$$g = 0, \pm 1, \pm 2, \dots; j = 1, 2, \dots, S$$

其中, $T(j)$ 为信号的最大正峰值时间; S 为最大正峰值个数; $-\pi \leq \theta \leq \pi$ 。

将 $j = 1, 2, \dots, S$ 代入式(24),可得:

$$\theta = 2g\pi + (S-1)\pi + \arcsin \sqrt{1 - \xi^2} - \sqrt{1 - 2\pi f \xi^2} \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S T(j) = 2g\pi + \alpha \quad (25)$$

$$\alpha = (S-1)\pi + \arcsin \sqrt{1 - \xi^2} - \sqrt{1 - 2\pi f \xi^2} \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S T(j)$$

由于 $-\pi \leq \theta \leq \pi$, 可得:

$$-\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} \leq g \leq \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} \quad (26)$$

由于 g 取整数,故可由式(26)确定 g 值,然后根据式(25)得到相位角。

3.2 基于 EEMD-NExT 的主导模式识别与预警

基于 EEMD-NExT 的低频振荡主导模式工况在线辨识与预警流程如图 2 所示,具体步骤如下:

- 通过 WAMS 平台获取系统正常运行下的 2 个信号并对其进行预处理,然后分别作 EEMD;
- 对 EEMD 得到的 IMF 分量由 EEMD 滤波器设置阈值获取低频振荡范围内的分量;
- 利用互相关系数识别所得分量的真假,将虚假模式予以剔除,得到真实模式;

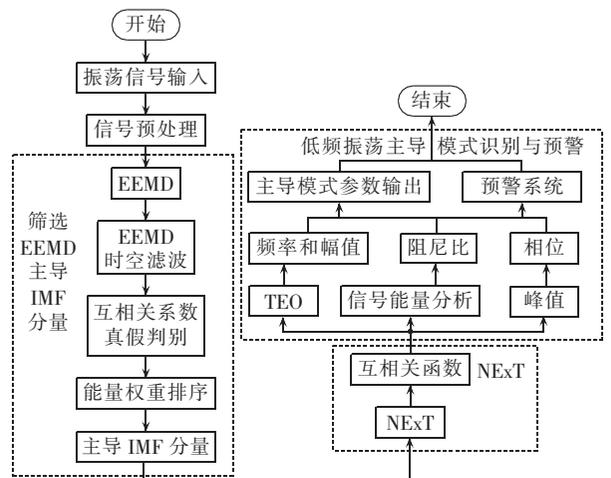


图 2 基于 EEMD-NExT 的低频振荡主导模式辨识与预警

Fig.2 Identification and warning of low-frequency oscillation dominant mode based on EEMD-NExT

d. 借助能量权重比对所得的真实模式分量进行排序,选择能量权重比最大的分量作为主导模式分量;

e. 通过 NE_xT 对 2 个主导模式分量求互相关函数,将其作为主导模式辨识的信号;

f. 对所得互相关函数分别通过 Teager 能量算子求时变幅值、时变频率,通过能量分析求取阻尼比,时域峰值法求相位;

g. 比较主导模式阻尼比与预警阈值大小,判断系统是否发出告警。

4 算例仿真

4.1 数值信号算例

取复合数值信号

$$x_x = 4 + 2e^{0.1t} + 15e^{-0.1t} \sin(0.6\pi t + \pi/2) + 6e^{-0.15t} \sin(2\pi t + \pi/3)$$

验证 EEMD 的抗模式混叠效果,以及依据相关系数甄别虚假模式的有效性和本文模式识别方法的可行性。

信号 x_x 的 EEMD 结果如图 3 所示。设定 EEMD 时空滤波器的阈值,此处设置带通滤波频率范围为 0.1~2 Hz,得到 imf7、imf8、imf9、imf10 这 4 个 IMF 分量,求取它们与原信号 x_x 的相关系数如表 1 所示,并根据本文模式识别方法辨识各分量的模式特征,结果如表 2 所示。

由表 1 可知,imf7 和 imf10 的互相关系数均小于 0.4;imf8 和 imf9 的互相关系数分别为 0.6469、0.9152,均比较大。由此判定 imf7 和 imf10 分量为伪分量。比较表 2 中 imf7、imf8 的模式信息和表 3 模式 2 的理论值可知,尽管两者频率很接近,但 imf8 的其他模式信息更接近理论值,由此进一步验证了 imf7 为虚假模式;表 2 中 imf10 的频率为 0.1638 Hz,真实模式中并不存在该分量,可见根据互相关系数判断 imf10 为虚假分量是有效的。表 3 为 2 个真实模式的理论值和本文方法的辨识结果,本文方法辨识误差较小,是一种低频振荡模式辨识的有效方法。

4.2 EPRI-36 节点算例

本文选取电科院的 EPRI-36 节点系统作为仿真算例,验证本文方法在多机系统研究中的有效性。

为了比较真实地模拟系统工况运行的特点,本文选择负荷随机扰动作为环境激励,分别在负荷 9、19 和 20 上设置幅度为 0.2 p.u. 的功率随机波动。文献[21]表明通过等值单机曲线可以很好地提取出主导振荡信息,为此根据扩展等面积准则(EEAC)理论对系统进行分群得,机组 1、2、3、4、5、7、8 为 S 群,机组 6 为 A 群,分别求取 S 群和 A 群的惯量中心 δ_s 、

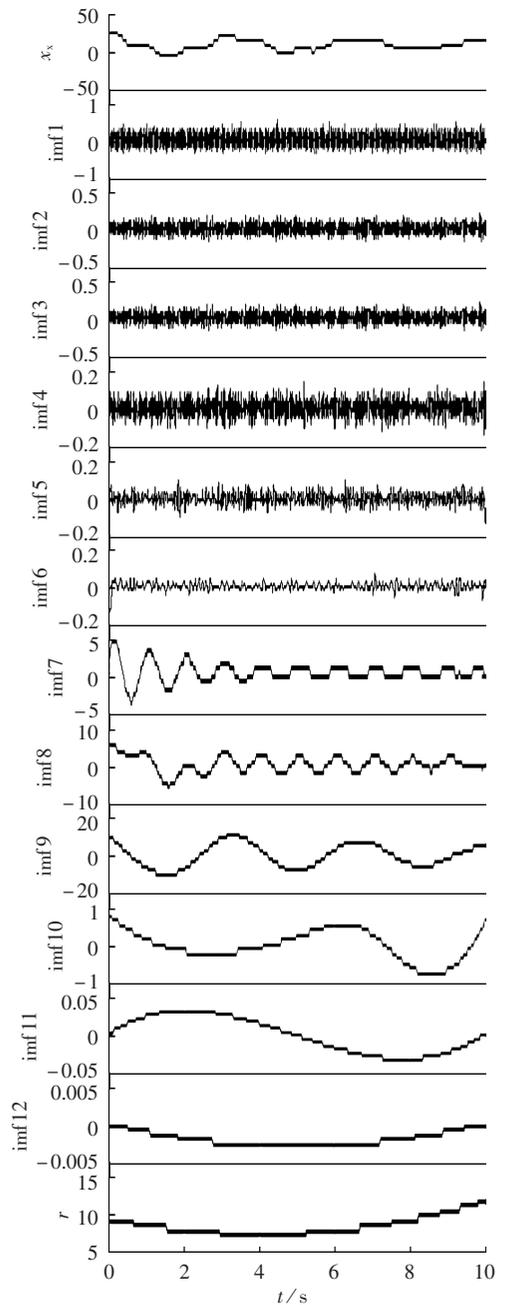


图 3 x_x 及 EEMD 效果图

Fig.3 x_x and its EEMD results

表 1 EEMD 时空滤波后的 IMF 分量互相关系数
Table 1 Cross-correlation coefficient of IMF components after EEMD spatiotemporal filtering

IMF 分量	互相关系数	IMF 分量	互相关系数
imf7	0.3739	imf9	0.9152
imf8	0.6469	imf10	0.2959

表 2 EEMD 时空滤波后的 IMF 分量模式信息
Table 2 Mode information of IMF components after EEMD spatiotemporal filtering

IMF 分量	初始幅值	频率/Hz	阻尼比	相位/rad
imf7	1.2876	0.9953	0.8038	0.7650
imf8	5.6797	1.0029	0.0526	0.8935
imf9	14.5445	0.2933	0.0522	1.1524
imf10	0.5001	0.1638	-0.2359	0.1102

表 3 本文方法辨识结果与理论值比较

Table 3 Comparison between results identified by proposed method and theoretical values

模式	方法	初始幅值	频率/Hz	阻尼比	相位/rad
模式 1	理论值	15.00	0.30	0.05	1.57
	本文方法	14.54	0.29	0.05	1.15
模式 2	理论值	6.00	1.00	0.02	1.05
	本文方法	5.68	1.00	0.05	0.89

δ_A , 并对它们添加 $\lambda_{SNR} = 20$ dB 的高斯白噪声以尽可能地再现工程实际中信号受噪声干扰的特点。分别对加了高斯白噪声的 δ_S 和 δ_A 进行 EEMD, 此处限于篇幅仅给出 δ_S 的 EEMD 效果图, 如图 4 所示。

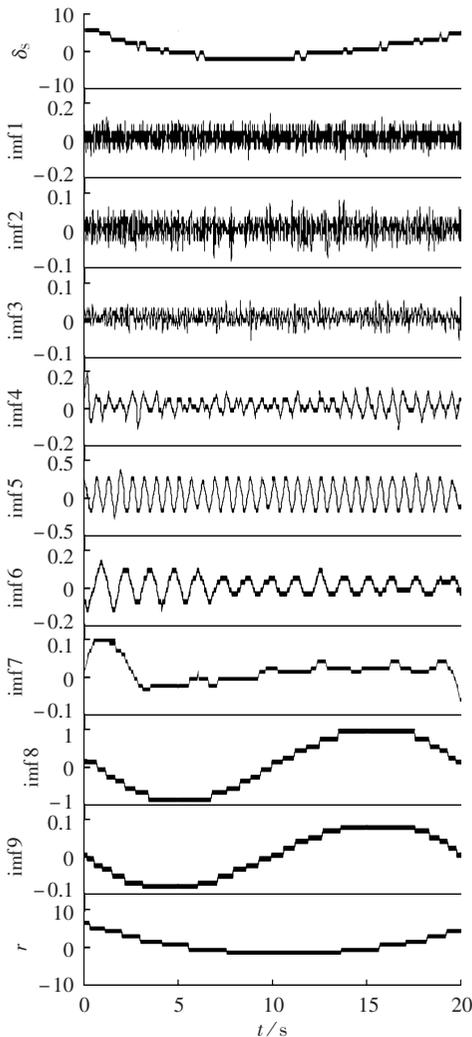


图 4 δ_S 的 EEMD 效果图

Fig.4 δ_S and its EEMD results

区间振荡模式较本地振荡模式危害更大, 其频率范围为 0.1~1 Hz, 将该范围留足裕度后设置为 EEMD 时空滤波器的带通范围, 求取滤波后的各 IMF 分量的互相关系数见表 4。对 imf6、imf7 求取信号能量后, 并计算其能量权重比从而可得能量权重排序, 结果如表 4 所示, 可知 imf6 为主导模式。

取 δ_S 和 δ_A 中对应的主导模式通过 NExT 求取互

表 4 EEMD 时空滤波后的 IMF 分量互相关系数

Table 4 Cross-correlation coefficient of IMF components after EEMD spatiotemporal filtering

IMF 分量	互相关系数	能量权重比/%
imf6	0.27	65.42
imf7	0.71	34.58

相关函数如图 5 所示, 再对其通过 Teager 能量算子求取主导模式频率, 通过能量分析求阻尼比。表 5 列出了本文方法、EMD-TEO-能量分析算法^[18]、Prony 算法、小干扰分析主导模式辨识结果, 其中 EMD-TEO-能量分析算法和 Prony 算法的辨识结果均为对发电机 7 与发电机 1 的相对功角信号加噪 20 dB 后辨识所得, 采样频率均为 100 Hz。

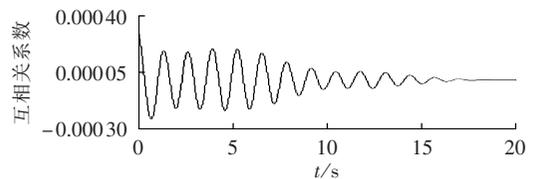


图 5 NExT 法得到的互相关函数

Fig.5 Cross-correlation function by NExT method

表 5 4 种方法对含噪信号辨识结果对比

Table 5 Comparison of identification results among four methods for signal with noise

方法	频率/Hz	阻尼比/%
本文方法	0.7760	1.0745
EMD-TEO-能量分析	0.7620	1.3532
Prony 分析	0.7925	3.1075
小干扰分析主导模式辨识	0.7775	1.1231

由表 5 可知, 当噪声为 20 dB 时, 4 种方法均能辨识出 EPRI-36 节点系统的主导模式, 本文方法和 EMD-TEO-能量分析的辨识结果精度均高于传统的 Prony 算法。本文方法的辨识结果更接近理论值, 具有良好的抗噪性能, 相比其他辨识方法无需人工激励, 是一种能有效在线辨识工况模式的方法。一般认为, 机电振荡模式的阻尼比小于 0.03 时系统会发生低频振荡失稳, 故本文设置预警阈值为 0.03, 由辨识得到的主导模式阻尼比在阈值以下, 此时系统发出告警须采取有效控制措施。

5 结论

a. EEMD 与傅里叶变换、Prony 分析等传统辨识方法相比, 更适合处理实际工程中的非线性、非平稳工况信号, 无需考虑定阶问题, 同时抗噪能力强且能改善模式混叠现象。

b. 通过 EEMD 时空滤波器对 IMF 分量滤波可以得到低频振荡工作范围内的信号, 互相关系数能将虚假模式从真实模式中辨识出来并将其从中剔除, 能量权重排序能找出主导模式分量。

c. 本文采用了 NExT,它是环境激励模式识别的有效方法,避免了传统模式辨识方法需人工激励给电力系统安全带来的危害,辨识出的模式参数更符合实际情况。

d. 本文方法可以实时快速地跟踪提取系统的主导模式信息,因此其在基于 WAMS 实测数据的低频振荡分析、在线监测、预警及阻尼控制器设计等方面具有较好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 徐遐龄,林涛,高玉喜,等. 基于 CBR 和 OAPID 的互联电网区间模式振荡预警[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):88-93.
XU Xialing,LIN Tao,GAO Yuxi,et al. Warning of inter-area mode oscillation based on CBR and OAPID for interconnected power grids[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(8):88-93.
- [2] 蔡国伟,杨德友,张俊丰,等. 基于实测信号的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电网技术,2011,35(1):59-65.
CAI Guowei,YANG Deyou,ZHANG Junfeng,et al. Mode identification of power system low-frequency oscillation based on measured signal[J]. Power System Technology,2011,35(1):59-65.
- [3] 宫璇,刘涤尘,董超,等. 基于能量函数的低频振荡新型预警指标[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):28-34.
GONG Xuan,LIU Dichen,DONG Chao,et al. Early warning indicator of low frequency oscillation based on energy function[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(1):28-34.
- [4] 宋墩文,杨学涛,丁巧林,等. 大规模互联电网低频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术,2011,35(10):22-27.
SONG Dunwen,YANG Xuetao,DING Qiaolin,et al. A survey on analysis on low frequency oscillation in large-scale interconnected power grid and its control measures[J]. Power System Technology,2011,35(10):22-27.
- [5] 刘志刚,李文帆,孙婉璐. Hilbert-Huang 变换及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):109-116.
LIU Zhigang,LI Wenfan,SUN Wanlu. Hilbert-Huang transform and its applications in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):109-116.
- [6] 陈允平,孙婉胜,张海梁,等. 低频振荡分析和控制方法的研究[J]. 高电压技术,2007,33(4):91-95.
CHEN Yunping,SUN Wansheng,ZHANG Hailiang,et al. Analysis and control method for low frequency oscillations[J]. High Voltage Engineering,2007,33(4):91-95.
- [7] 郝正航,李少波,周洁娜,等. 负荷激励下的互联系统振荡稳定性在线辨识[J]. 电工技术学报,2008,23(6):83-88.
HAO Zhenghang,LI Shaobo,ZHOU Jiena,et al. On-line identification of oscillation stability for bulk power systems based on loads excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(6):83-88.
- [8] 吴超,陆超,韩英铎,等. 计及模型定阶的低频振荡模式类噪声信号辨识[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):1-6.
WU Chao,LU Chao,HAN Yingduo,et al. Power system oscillation modes estimation based on ambient signals considering model order selection[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):1-6.
- [9] 韩建平,李达文. 基于 Hilbert-Huang 变换和自然激励技术的模态参数识别[J]. 工程力学,2010,27(8):54-59.
HAN Jianping,LI Dawen. Modal parameter identification based on Hilbert-Huang transform and natural excitation technique[J]. Engineering Mechanics,2010,27(8):54-59.
- [10] 陈卓. 工况模态分析在低频振荡辨识中的应用初探[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(8):34-37.
CHEN Zhuo. Tentative application of operational modal analysis in identifying power systems low frequency oscillations[J]. Power System Protection and Control,2009,37(8):34-37.
- [11] 王济,胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,知识产权出版社,2006:207-208.
- [12] JAMES G H. Extraction of modal parameters from an operation HAWT using the Natural Excitation Technique(NExT)[J]. Asme Sol Energy Div Publ Sed,1994,15:227-232.
- [13] 肖振宇,陈磊,闵勇,等. 基于自然激励技术的低频振荡模态参数识别[J]. 华东电力,2013,41(5):991-994.
XIAO Zhenyu,CHEN Lei,MIN Yong,et al. Low frequency oscillation modal parameter identification based on natural excitation technique[J]. East China Electric Power,2013,41(5):991-994.
- [14] WU Zhaohua,HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition:a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis,2009,1(1):1-41.
- [15] 焦彦军,胡春. 基于改进 EEMD 方法的数字滤波器[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):64-67.
JIAO Yanjun,HU Chun. Digital filter based on improved EEMD method[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):64-67.
- [16] 范新桥,朱永利,卢伟甫. 基于多点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):39-45.
FAN Xinqiao,ZHU Yongli,LU Weifu. Traveling wave fault location based on multiple current measurements for transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):39-45.
- [17] MARAGOS P,KAISER J F,QUATIORI T F. Energy separation in signal modulations with applications to speech analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,1993,41(10):3024-3051.
- [18] 王娜娜,刘涤尘,廖清芬,等. 基于 EMD-TEO 及信号能量分析法的主导低频振荡模式识别[J]. 电工技术学报,2012,27(6):198-204.
WANG Nana,LIU Dichen,LIAO Qingfen,et al. Identification of the dominant inertial mode based on EMD-TEO and signal energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(6):198-204.
- [19] 穆钢,王宇庭,安军,等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):7-11.
MU Gang,WANG Yuting,AN Jun,et al. Signal energy method for identification of main oscillation mode in power system based on disturbed trajectory[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(19):7-11.
- [20] 李中付,华宏星,宋汉文,等. 用时域峰值法计算频率和阻尼[J]. 振动与冲击,2001,20(3):5-6,31.
LI Zhongfu,HUA Hongxing,SONG Hanwen,et al. Identification of frequencies and damping ratios with time domain peak
(下转第 122 页 continued on page 122)

- LI Bin, CHANG Wenhua, ZHAO Changbing, et al. Earthing fault reactance relay of EHV transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 8-12.
- [7] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 19-27.
- [8] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005: 203-217.
- [9] 邱关源. 电路[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 1999: 80-86.

作者简介:



陈福锋(1979—), 男, 江苏宜兴人, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统继电保护的研究和开发工作(E-mail: fufeng-chen@sac-china.com)。

Improvement of grounding-fault distance protection under CT disconnection

CHEN Fufeng

(Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: The behavior of distance protection under CT(Current Transformer) disconnection is studied and its influence is analyzed based on the fault-circuit resistance measured by the protection, which shows that the influencing factors are the direction of power flow and the position of faulty phase. At the power-source side, the grounding-fault distance protection tends towards the miss operation when the in-zone fault occurs in the leading phase relative to the phase of CT disconnection and towards the improper operation when the out-zone fault occurs in the lagging phase relative to the phase of CT disconnection, while it behaviors on the contrary at the load side. Combined with the method of CT disconnection detection, an adaptive grounding-fault distance protection scheme is proposed, which is theoretically analyzed and verified by the test. Suggestions are given on the CT circuit and protection configuration.

Key words: relay protection; CT disconnection; grounding-fault distance protection; overstepped action; miss operation; electric grounding

(上接第116页 continued from page 116)

- values[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001, 20(3): 5-6, 31.
- [21] 郝思鹏, 张仰飞, 李先允. 选择合适的曲线提取低频振荡信息[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 23-26.
- HAO Sipeng, ZHANG Yangfei, LI Xianyun. Select swing curve to distill low frequency oscillation information [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 23-26.

作者简介:

汪颂军(1987—), 男, 湖北黄石人, 硕士研究生, 主要研究



汪颂军

方向为电力系统运行与控制(E-mail: sjwang@whu.edu.cn);

刘涤尘(1953—), 男, 湖北红安人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力自动监控技术、电力系统运行与控制、电力电子技术应用、电力故障诊断及电磁兼容等(E-mail: dcliu@whu.edu.cn);

廖清芬(1975—), 女, 浙江衢州人, 副教授, 博士, 通讯作者, 从事电力系统稳定与控制方面的研究。

Online dominant mode identification and warning based on EEMD-NExT for low-frequency oscillation in operating conditions

WANG Songjun, LIU Dichen, LIAO Qingfen, ZHOU Yutian, WANG Yajun, WANG Yifei, ZHAO Yijie

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A method of online low-frequency oscillation dominant mode identification based on the dynamic measurements of WAMS(Wide-Area Measurement System) in operating conditions is proposed, which combines EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition) with NExT(Natural Excitation Technique). The EEMD is used to deal with the unstable signal and select the dominant mode with its spatiotemporal filter, cross-correlation coefficients and signal energy weights. The NExT is used to obtain the cross-correlation function. The time-varying amplitude and frequency are identified by the Teager energy operator and the damping ratio is identified by the signal energy analysis, which are applied to the early warning system. Simulative results of case study show that, without artificial incentive and with strong anti-noise ability, the system dominant mode is identified and the illusive mode is eliminated accurately in realtime.

Key words: ensemble empirical mode decomposition; natural excitation technique; operational modal analysis; low-frequency oscillation; dominant mode identification; stability