

DOI: 10.7667/PSPC170435

基于 FastICA-MP 算法的次同步振荡模态参数辨识

赵兰明¹, 李宽², 张友泉³, 郑帅¹, 徐大鹏¹

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: WAMS 在电力系统中的应用越来越广, 使得电力系统次同步振荡模态参数在线辨识成为可能。但系统中存在大量电力电子设备, 造成了 WAMS 采样信号中存在较强的噪声干扰, 影响了振荡模态参数辨识的准确性。鉴于快速独立分量分析可以实现噪声信号与原始信号的有效分离, 提出首先通过快速独立分量分析对采样信号进行预处理, 然后将滤噪后的信号通过矩阵束算法进行辨识得到振荡模态参数。通过此方法可以进一步提高矩阵束的辨识准确度。通过理想仿真算例和国内某特高压直流输电系统作为实际仿真算例进行分析。仿真结果表明, 快速独立分量分析可有效分离噪声信号, 提高了矩阵束辨识准确性, 为后续阻尼控制器的设计奠定了基础。

关键词: 次同步振荡; 快速独立分量分析; 矩阵束算法; 特高压直流输电

Parameter identification of subsynchronous oscillation based on FastICA-MP algorithm

ZHAO Lanming¹, LI Kuan², ZHANG Youquan³, ZHENG Shuai¹, XU Dapeng¹

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd, Jinan 250013, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: The online identification of subsynchronous oscillation modal parameter became possible with a wide use of WAMS in power system. However, there is much power electronic equipment in the power system, which causes strong interference noises in WAMS sampled signal, and the veracity of vibration modal parameters is influenced. Because of the Fast Independent Component Analysis (FastICA) could separate noise signal from observed signal. This paper first presents to pretreat sampling signal through the FastICA. And then it identifies the denoised signals through Matrix Pencil (MP) to obtain the oscillation modal parameter, with which he recognition accuracy of MP could be enhanced based on FastICA-MP. This paper takes an ideal example and a UHVDC system in China as the simulation examples. The simulation results show that the FastICA can separate noise signal effectively and improve the MP identification accuracy, laying the foundations for the design of supplementary subsynchronous damping controller.

Key words: subsynchronous oscillation; fast independent component analysis; matrix pencil; UHVDC

0 引言

近年来, 为解决东西部能源与用电量需求的不平衡问题, ± 800 kV 特高压直流输电工程(Ultra High Voltage Direct Current, UHVDC)在中国得到大力发展^[1-4]。虽然特高压直流工程可实现跨区域大容量输送电力, 缓解了东部地区负荷的需求, 但多个特高压直流输电工程的连续投运也带来了一定的问题。特高压直流输电工程整流侧一般有多个火电机组, 当送端交流系统受到扰动或直流系统受到扰动后, 由于直流输电系统的快速可控特性及整流侧的定电

流控制策略, 有可能引起直流输电系统与发电机轴系之间存在能量交换, 当这种能量交换形成正反馈时, 就有引发送端火电机组严重次同步振荡(Subsynchronous Oscillation, SSO)的风险^[5-8]。

电力系统次同步振荡严重影响着电力系统的安全稳定运行, 若发电机轴系质块间发生振荡, 严重情况下有可能造成发电机轴系断裂, 故针对次同步振荡阻尼控制器的设计有重要意义, 而次同步振荡模态参数的准确辨识是阻尼控制器设计的基础。随着广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)^[9]的广泛应用, 电力系统的实时测量数据可

以得到,使次同步振荡模态参数的在线辨识成为可能。但在实际系统中存在大量的柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)^[10]等电力电子设备以及风电、光伏发电等非恒出力电源,这就造成了电网中存在强噪声干扰,这给次同步振荡模态参数的准确辨识带来了困难。

目前针对电力系统次同步振荡以及低频振荡较为常用的辨识方法是特征根分析法,这其中包括 Prony 算法^[11]、TLS-ESPRIT^[12-13]算法、随机子空间算法(Stochastic Subspace Identification, SSI)^[14]以及矩阵束算法(Matrix Pencil, MP)^[15-16]等。以上几种算法中, Prony 算法应用最为广泛,但 Prony 算法不适合分析大电网数据,容易陷入“维数灾”问题,文献[17]提出通过奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)来对 Prony 算法进行改进,并用于次同步谐振模态参数辨识,但 SVD 分解存在系统阶数难以确定的问题。TLS-ESPRIT 和 SSI 均需要通过 SVD 分解来确定模态阶数,但在含噪声情况下, SVD 分解有可能会系统阶数难以确定的情况,这就造成了模态参数辨识不准确的问题。文献[18]提出利用互相关函数(Cross-correlation Function, CCF)来对 MP 算法进行改进以增大 MP 算法的抗噪声能力,并采用此方法对低频振荡模态参数进行辨识,但文中仅采用 8 机 36 节点作为仿真模型,未对实际系统进行仿真验证。

鉴于快速独立分量分析(Fast Independent Component Analysis, FastICA)具有较好的降噪效果,且具有一定的适应能力^[19-20],本文提出首先采用 FastICA 对观测信号进行预处理,然后再采用 MP 算法进行振荡模态参数辨识。通过构造理想算例信号加入噪声干扰以验证 FastICA-MP 算法的有效性,与 MP 算法对比分析可知, FastICA-MP 可有效降低噪声干扰,提高了矩阵束算法辨识的准确性。然后进一步通过某特高压直流仿真系统作为实例仿真模型进行验证。理想算例和实际算例的仿真结果表明, FastICA-MP 可在强噪声环境下准确地辨识出振荡模态参数。

1 基本原理

1.1 FastICA 算法

通过 WAMS 采集到的观测信号一般含有噪声干扰,鉴于噪声信号与原信号之间相互独立,故观测信号可以看作噪声信号与原信号叠加后的信号,通过 FastICA 算法可将原信号与噪声信号进行有效

分离。在 ICA 线性组合模型中,观测信号用向量 \mathbf{X} 表示, ICA 线性化模型为

$$\mathbf{X} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S} \quad (1)$$

式中: \mathbf{S} 表示源信号向量; \mathbf{A} 表示混合矩阵。

观测信号 \mathbf{X} 中包括原信号 $x(t)$ 和噪声信号 $\varepsilon(t)$, 式(1)可转化为

$$\begin{bmatrix} x(t) & \varepsilon(t) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_1(t) & s_2(t) \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中, $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别为非高斯分量的独立源信号。

正常情况下,混合矩阵 \mathbf{A} 和独立源信号 $s(t)$ 均为未知信号, ICA 的目的就是在混合矩阵和独立源信号未知情况下将原信号从观测信号中分离,引入分离矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{A}^{-1}$, 式(1)可表示为

$$\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} \approx \mathbf{S} \quad (3)$$

鉴于独立源信号 $s(t)$ 是非高斯分量,且高斯性越强,负熵越大,故本文以负熵最大化作为目标函数提取独立源,最终实现原信号与噪声信号的分离。

负熵可表示为

$$J(s) = H(s_{\text{Gauss}}) - H(s) \quad (4)$$

$$H(s) = -\int p(s) \lg p(s) dy \quad (5)$$

式中: $p(s)$ 表示独立源 s 的概率密度; s_{Gauss} 为与 s 具有相同协方差矩阵的高斯分布向量。

当 s 具有高斯分布时, $J(s) = 0$, 故负熵 $J(s)$ 可以用来衡量独立源 s 的非高斯性。通常式(4)可近似表示为

$$J(s) \approx [E|G(s)| - E|G(s_{\text{Gauss}})|]^2 \quad (6)$$

式中: E 表示统计期望; $G(s) = -e^{-s^2/2}$ 。

通过 ICA 算法进行分离原信号时,需要估计整个 ICA 模型,这就造成了原信号分离效率低,不适用于次同步振荡模态参数在线辨识。故采用 FastICA 算法来提取分离矩阵和其对应的独立分量, FastICA 的基本步骤如下所述。

Step 1: 对观测信号 \mathbf{X} 进行数据集中、白噪声化等预处理得到 x , 则 $E[x \cdot x^T] = \mathbf{I}$, 且 x 具有零均值、单位方差等特性。

Step 2: 提取分离矩阵所对应的独立分量,如式(7)所示。

$$\hat{s}_i^{(n)} = w_i^T(n) \cdot x \quad (7)$$

式中: $\hat{s}_i^{(n)}$ 表示 $\mathbf{S}^{(n)}$ 中的某一独立分量; $w_i(n)$ 表示分离矩阵中与独立分量相对应的某一行向量; n 和 i 分别表示迭代的次数和独立分量的个数。

Step 3: 以式(6)负熵最大作为目标函数对分离

结果 $\hat{s}_i^{(n)}$ 进行非高斯性度量, 即通过不断迭代调整 $w_i(n)$ 来使 $\hat{s}_i^{(n)}$ 的负熵最大。迭代公式为

$$w_i(n+1) = E \left\{ xG' \left(w_i^T(n) \cdot x \right) \right\} - E \left\{ xG'' \left(w_i^T(n) \cdot x \right) \right\} \cdot w_i(n) \quad (8)$$

Step 4: 假定 $w_i(0)$ 为单位范数向量, 当式(9)满足时, 迭代收敛, 即可认为一个独立源信号被分离出, 否则继续进行 Step 3 直至满足收敛结果。

$$\|w_i(n+1) \times w_i^T(n)\| = 1 \quad (9)$$

Step 5: 通过式(10)进行标准化处理。

$$w_i(n) = w_i(n) / \|w_i(n)\| \quad (10)$$

当源信号 \mathbf{S} 中含有多个独立分量式, 重复以上过程可实现多个独立源信号 $s(t)$ 的分离, 每分离出一个独立源信号 $s_i(t)$, 将之依次从观测信号 \mathbf{X} 中减去, 最终可实现独立源信号 $s_i(t)$ 的完全分离。

1.2 MP 算法

通过 FastICA 算法将原信号 $x(t)$ 从观测信号分离出以后, 再通过 MP 算法辨识出次同步振荡模式参数, 具体步骤如下所述。

Step 1: 将原信号 $x(t)$ 构造为 Hankle 矩阵的形式。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(L+1) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(L+2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N-L) & x(N-L+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix}_{(N-L) \times (L+1)} \quad (11)$$

式中, L 一般经验取值为 $L=N/4 \sim N/3$ 。

Step 2: 对 Hankle 矩阵进行奇异值分解。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S}\mathbf{V}\mathbf{D}^T \quad (12)$$

式中: \mathbf{S} 和 \mathbf{D} 分别为 $(N-L) \times (N-L)$ 和 $(L+1) \times (L+1)$ 阶的正交矩阵; \mathbf{V} 为 $(N-L) \times (L+1)$ 阶的对角阵; 其中矩阵 \mathbf{Y} 的第 i 个奇异值可表示为 σ_i 。

鉴于原信号 $x(t)$ 已经滤除了噪声干扰, 故 Hankle 矩阵中有 n 个奇异值不为 0, 即可认为系统阶数为 n 。奇异值矩阵 \mathbf{V}' 可表示为

$$\mathbf{V}' = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \sigma_n \\ & & 0_{(N-L-n) \times n} & & \end{bmatrix}_{(N-L) \times n} \quad (13)$$

Step 3: 重构 Hankle 矩阵, 将原 Hankle 矩阵 \mathbf{Y} 前 n 个主导右特征向量 \mathbf{D} 的最后一行和第一行删去

后形成新的矩阵, 分别记为 \mathbf{D}_1 和 \mathbf{D}_2 , 得到两个新的 Hankle 矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{Y}_1 = \mathbf{S}\mathbf{V}\mathbf{D}_1^T \\ \mathbf{Y}_2 = \mathbf{S}\mathbf{V}\mathbf{D}_2^T \end{cases} \quad (14)$$

式中, 矩阵 \mathbf{Y}_1 和 \mathbf{Y}_2 均为 $(N-L) \times L$ 阶。

Step 4: 求解广义特征值, 将式(14)中两个新 Hankle 矩阵组成矩阵束 $\mathbf{Y}_2 - \lambda\mathbf{Y}_1$, 并求解矩阵束的特征值, 即求解式(15)的特征值。

$$\mathbf{G} = \mathbf{Y}_1^+ \mathbf{Y}_2 \quad (15)$$

式中, \mathbf{Y}_1^+ 为 \mathbf{Y}_1 的伪逆矩阵。由 Step 2 已知系统阶数为 n , 即可确定矩阵 \mathbf{G} 存在 n 个特征值。

Step 5: 通过式(16)和式(17)求解衰减因子和振荡频率。

$$\zeta_i = \text{Re} \frac{\ln \lambda_i}{T} \quad (16)$$

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \text{Im} \frac{\ln \lambda_i}{T} \quad (17)$$

式中: ζ 和 f 分别表示次同步振荡模式的衰减因子和振荡频率; λ 表示矩阵 \mathbf{G} 的特征值; T 表示观测信号的采样频率。

由此, 先通过 FastICA 对 WAMS 采样信号进行预处理, 以降低实际系统中的噪声干扰, 然后通过 MP 算法辨识出振荡模式的振荡频率和衰减因子, 完成次同步振荡模式参数的在线辨识。

2 算例仿真

2.1 理想算例

构造理想信号

$$x(n) = x_1(n) + x_2(n) + x_3(n) \quad (18)$$

式中:

$$\begin{cases} x_1(n) = 0.77e^{0.57t} \cos(2\pi \times 0.2t + \pi/3) & t \in [0, 1.5] \\ x_2(n) = 0.44e^{-0.18t} \cos(2\pi \times 2.4t + \pi/8) & t \in (1.5, 4] \\ x_3(n) = 0.58e^{0.24t} \cos(2\pi \times 2.1t + \pi/2) & t \in [3, 5] \end{cases} \quad (19)$$

在理想信号式(18)的基础上加入噪声干扰, 干扰后的信号如图 1 所示。

为验证 FastICA-MP 算法在强噪声环境下的滤波效果, 首先通过 FastICA 算法滤除噪声, 噪声滤除以后的信号如图 2 所示。

其中, 图 2(a)为分离噪声信号后的理想信号, 图 2(b)为分离的噪声信号。由图 2 可知, 通过 FastICA 可实现噪声信号与原信号的有效分离。

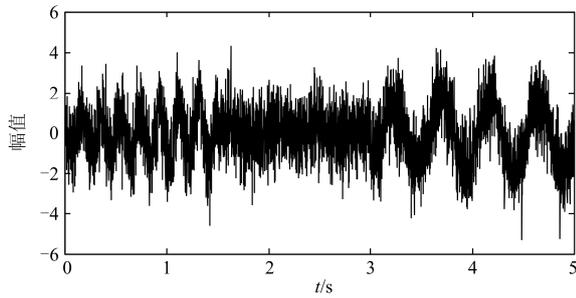


图 1 加入噪声干扰后的理想信号

Fig. 1 Ideal signal waveform after adding noise

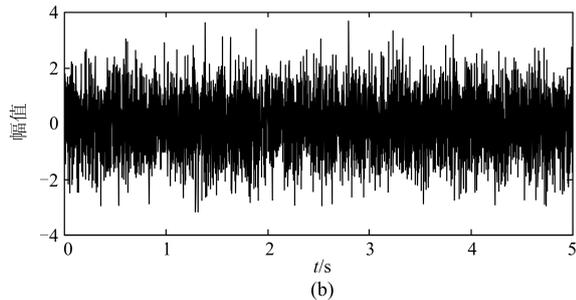
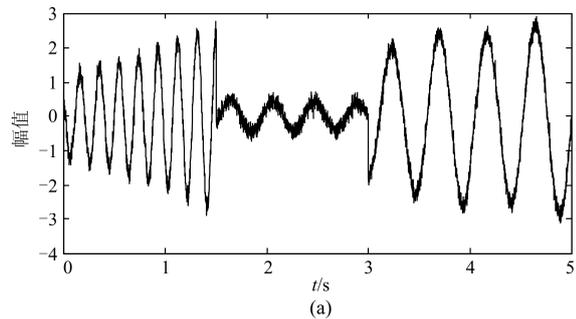


图 2 分离后的原信号与噪声信号

Fig. 2 Separated original signals and noise signals

分别采用 FastICA-MP 算法和 MP 算法对加入噪声后的理想信号算例进行辨识, 频率和衰减因子的辨识结果如表 1 所示。

由表 1 可知, FastICA-MP 算法相对于 MP 算法, 在噪声环境下, 振荡模式的衰减因子和频率的辨识都更为准确。说明 FastICA 可有效滤除采样信号中的噪声信号, 提高了 MP 算法对次同步振荡模态参数辨识的准确性。

表 1 辨识方法对比

Table 1 Comparison of identification methods

方法	频率/Hz		衰减因子	
	数值	相对误差/%	数值	相对误差/%
MP	0.198 7	0.65	0.564 1	1.04
	2.411 0	0.46	-0.189 4	5.22
	2.122 4	1.07	0.250 1	4.21
FastICA-MP	0.200 1	0.05	0.568 7	0.23
	2.398 4	0.067	-0.185 1	2.83
	2.103 5	0.167	0.246 3	2.62

2.2 实例特高压直流系统

以国内某特高压直流输电工程作为实例仿真模型, 额定直流电压为 ± 800 kV, 额定传输功率为 10 000 MW, 整流侧有 5 个火电厂, 每个火电厂均有 2 台 1 000 MW 的火电机组, 送端交流系统有三回 750 kV 交流线路与整流站相连, 在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建此直流系统, 其拓扑结构如图 3 所示。

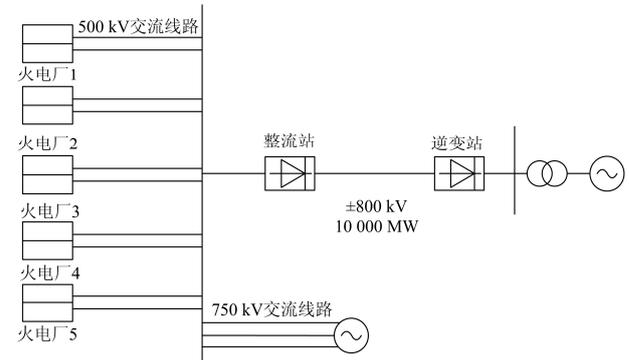


图 3 拓扑结构图

Fig. 3 Topological structure diagram

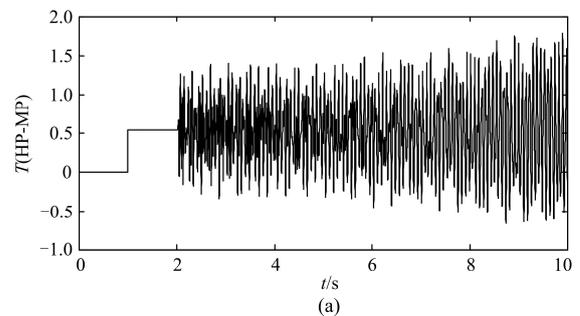
由图 3 可知, 此直流输电系统的输送容量基本与送端火电机组的容量在同一数量级, 当三回 750 kV 线路断开形成直流孤岛运行时, 送端机组有发生次同步振荡的风险。在仿真建模中, 送端机组采用典型四质块轴系模型, 轴系参数如表 2 所示。

表 2 火电机组轴系参数

Table 2 Shaft system parameters of thermal power

	惯性时间常数/s	互阻尼系数/p.u.	刚性系数/p.u.
高压缸	0.212 5		
中压缸	1.596 5	0.076	12 544
低压缸	1.712 5	0.098	16 500
转子	0.731	0.076	22 161

当送端交流系统与整流站相连的三回 750 kV 交流线路断开后, 直流输电系统孤岛运行, 这时在整流侧换流母线处施加一个三相短路故障, 故障持续时间为 0.02 s, 火电厂 1 的轴系质块轴系转矩偏差时域仿真图如图 4 所示。



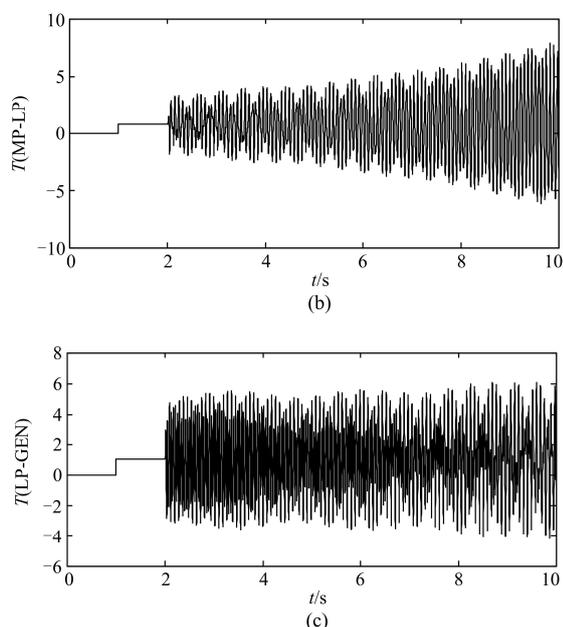


图 4 各缸体间轴系转矩偏差

Fig. 4 Shaft torsional vibration between turbine cylinders

由图 4 可知, 在直流处于孤岛运行状态下, 整流侧换流母线受到扰动时, 会引发送端机组的次同步振荡发生, 且各缸体间的振荡呈发散状态, 严重影响了电力系统的安全稳定运行。基于 FastICA-MP 算法对火电厂 1 的发电机转速信号进行分析, 得到的次同步振荡模态参数如表 3 所示。

表 3 振荡模态辨识结果

Table 3 Identification results of oscillation modal

模式	振荡频率/Hz	衰减因子	阻尼比/%
Mode1	13.303 0	0.264 8	-0.316 8
Mode2	24.377 0	-0.106 0	0.069 2
Mode3	29.444 6	-0.350 2	0.189 3

由表 3 可知, 发电厂 1 存在三个振荡模态, 模态 1 为负阻尼, 模态 2 和模态 3 为正阻尼, 但阻尼很小。在发电机次同步振荡模态中, 频率越小, 振荡幅值越大, 虽然模态 2 和模态 3 是正阻尼, 但模态 1 为主导模态, 最终会造成振荡模态发散, 这与图 4 时域仿真结果相一致。

3 结论

MP 算法基于 SVD 分解具有一定的抗噪能力, 但 WAMS 采样信号中含有强噪声干扰, MP 算法会出现辨识不准确的情况。本文提出通过 FastICA 算法对采样信号进行预处理, 将原始信号从观测信号中分离, 以降低噪声干扰, 然后通过 MP 算法进行次同步振荡模态参数辨识, 进一步提高了此算法在

噪声环境下的辨识准确性。

通过理想算例和实际特高压直流仿真算例进行验证, 仿真结果表明, FastICA 可有效地将噪声信号从观测信号中分离, 具有一定的工程意义, 提高了次同步振荡模态参数在线辨识的准确性, 为次同步振荡阻尼控制器的设计奠定了基础。

参考文献

- [1] 周国伟, 顾用地, 周建平, 等. 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 122-128.
ZHOU Guowei, GU Yongdi, ZHOU Jianping, et al. Analysis of non characteristic harmonic in UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 122-128.
- [2] 付蓉, 孙万钱, 汤奕, 等. 特高压直流分层接入方式下稳态特性研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 81-86.
FU Rong, SUN Wanqian, TANG Yi, et al. Steady-state characteristics of UHVDC hierarchical connection mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 81-86.
- [3] 王华锋, 林志光, 张海峰, 等. ± 800 kV 特高压直流工程换流阀故障分析与优化设计方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 67-73.
WANG Huafeng, LIN Zhiguang, ZHANG Haifeng, et al. Fault analysis of ± 800 kV UHVDC transmission converter valve and optimal design method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 67-73.
- [4] 卢东斌, 王永平, 王振曦, 等. 分层接入方式的特高压直流输电逆变侧最大触发延迟角控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1808-1816.
LU Dongbin, WANG Yongping, WANG Zhenxi, et al. Inverter maximum Alpha control in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1808-1816.
- [5] 王坤, 徐政, 杜宁, 等. 并列机组轴系次同步振荡特性及采用 SSDC 抑制多机系统次同步振荡研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 321-329.
WANG Kun, XU Zheng, DU Ning, et al. Research on shaft subsynchronous oscillation characteristic of parallel generators and SSDC application in mitigating SSO of multi-generator System[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 321-329.
- [6] 张鹏, 毕天姝. HVDC 引起次同步振荡暂态扰动风险的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 961-968.
ZHANG Peng, BI Tianshu. Mechanism analysis of large disturbance risk of subsynchronous[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2016, 36(4): 961-968.
- [7] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-118.
SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC-HVDC and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-118.
- [8] 江桂芬, 孙海顺, 陈霞, 等. 宁夏多直流外送系统 SSO 特性分析及次同步阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 30-38.
JIANG Guifen, SUN Haishun, CHEN Xia, et al. Sub-Synchronous Oscillation characteristics analysis and SSDC design of ningxia multiple DC transmissions system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 30-38.
- [9] 邵雅宁, 唐飞, 刘涤尘, 等. 一种适用于 WAMS 量测数据的系统暂态功角稳定评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 33-39.
SHAO Yaning, TANG Fei, LIU Dichen, et al. An approach of transient angle stability assessment in power system for WAMS measured data[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 33-39.
- [10] 施鹏佳, 文云峰, 郭创新, 等. 计及 FACTS 校正控制策略的电网静态安全风险评估[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2566-2570.
SHI Jiapeng, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Power grid risk-based static security assessment considering corrective control strategy of FACTS devices[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2566-2570.
- [11] TRUDNOWSKI D J. Making PRONY analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 226-231.
- [12] HUFFEL S V. Enhanced resolution based on minimum variance estimation and exponential data modeling[J]. Signal Processing, 1993, 33(3): 333-355.
- [13] 李天云, 祝磊, 宋莉, 等. 基于 TLS-ESPRIT 的同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 38-49.
LI Tianyun, ZHU Lei, SONG Li, et al. Parameter identification of synchronous machine based on TLS-ESPRIT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 38-49.
- [14] 刘洋, 田石柱. 基于随机子空间的结构参数识别及振动台试验验证[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 111-117.
LIU Yang, TIAN Shizhu. Parameter identification of structures based on stochastic subspace and its validation in shaking table testing[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2004, 24(2): 111-117.
- [15] SANCHEZ-GASCA J J, CHOW J H. Performance comparison of three identification methods for the analysis of electromechanical oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 995-1002.
- [16] HUA Y, SARKER T K. On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39(4): 892-900.
- [17] 彭莉萍, 魏辉, 刘桂平, 等. 通过改进 Prony 算法辨识交流串补引起的次同步谐振模态参数[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(增刊): 63-67.
PENG Liping, WEI Hui, LIU Guiping, et al. Detection of subcynchronous resonance caused by series capacitive compensation based on improved Prony[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(S): 63-67.
- [18] 苗友忠, 罗玮, 刘兆辉, 等. 基于互相关函数和矩阵束算法的电力系统低频振荡在线辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(12): 97-102.
MIAO Youzhong, LUO Wei, LIU Zhaohui, et al. Power system low frequency oscillation online identification based on CCF-MP[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(12): 97-102.
- [19] 江华根, 杨斌红, 敖春来, 等. 基于快速独立分量分析的自电测井信号去噪[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(1): 29-33.
JIANG Huagen, YANG Binhong, AO Chunlai, et al. Noise removal from spontaneous potential logging signal based on FastICA[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(1): 29-33.
- [20] 胡志冰, 蔡国伟, 刘钺. 基于 FastICA 和 Prony 算法的低频振荡参数辨识[J]. 电测与仪表, 2014, 51(18): 39-43.
HU Zhibing, CAI Guowei, LIU Cheng. Parameter identification of low frequency oscillation based on fast ICA and Prony algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(18): 39-43.

收稿日期: 2017-03-26; 修回日期: 2017-06-09

作者简介:

赵兰明(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划、新能源发电; E-mail: zhaolanming@sdepcci.com

李 宽(1988—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、电力系统继电保护;

张友泉(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统规划工作。

(编辑 魏小丽)