

基于确定-随机子空间的电力系统 外部系统暂态等值

赵妍¹, 柳旭², 孙硕³, 朱建华⁴, 聂永辉⁵

(1. 东北电力大学输变电技术学院, 吉林省吉林市 132012; 2. 国网平湖供电公司, 浙江省平湖市 314200;
3. 国网四平供电公司, 吉林省四平市 136000; 4. 润电能源科学技术有限公司, 郑州市 450000;
5. 东北电力大学教务处, 吉林省吉林市 132012)

摘要: 交直流混合输电技术的迅猛发展和电力电子设备在电力系统中普遍使用, 使电力系统电磁暂态仿真分析及研究的必要性越来越高。但是, 对实际大电力系统进行整体的电磁暂态仿真建模复杂且耗时很长。针对此问题, 提出了基于确定-随机子空间的电力系统外部系统暂态等值新方法。首先, 基于外部系统输入和输出数据, 采用确定-随机子空间方法建立确定的激励-系统-响应模型, 准确求解系统的状态空间表达式。然后, 将外部系统端口状态空间表达式, 转化成导纳有理函数式, 根据零极点构建 RLCG 等值电路, 进行建模等效简化, 在宽频段范围内实现了对外部系统的暂态等值构建。最后, 通过仿真和实测数据证明了文章所提方法有效缩短了仿真耗时, 加快了仿真进程。

关键词: 确定-随机子空间(CDSI); 等值方法; 电磁暂态; 外部系统

CDSI-Based Transient Equivalence of a Power System with External Systems

ZHAO Yan¹, LIU Xu², SUN Shuo³, ZHU Jianhua⁴, NIE Yonghui⁵

(1. School of Power Transmission and Distribution Technology, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. State Grid Pinghu Electric Power Co., Ltd., Pinghu 314200, Zhejiang Province, China;
3. State Grid Siping Electric Power Co., Ltd., Siping 136000, Jilin Province, China;
4. Rundian Energy Science and Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;
5. Academic Affairs Office of Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: With the rapid advancements in AC-DC hybrid transmission technology and the growing prevalence of power electronic equipment in power systems, there is an escalating need to analyze and study the electromagnetic transient simulation of these systems. However, modeling the electromagnetic transients in actual large power systems proves to be both complex and time-consuming. To address this issue, a novel approach based on combined deterministic-stochastic identification is proposed for external system transient equivalence in power systems. Initially, a deterministic excitation system response model is established using input and output data from the external system. This model is developed via a deterministic random subspace method, allowing for accurate resolution of the state-space expression of the system. Subsequently, this state-space expression for the external system is converted into an admittance rational function expression. An RLCG equivalent circuit is then constructed based on the zero-pole locations, simplifying the modeling process and enabling the construction of a transient equivalent for the external system across a wide frequency band. In the final stage, simulation and measured data are employed to validate the proposed method. The findings demonstrate that this new approach can significantly reduce simulation time and accelerate the overall simulation process.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61973072).

KEYWORDS: combined deterministic-stochastic identification (CDSI); equivalent methods; electromagnetic transients; external systems

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2023)10-0012-10

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.10.002

0 引言

以新能源为主体的新型电力系统呈现高度电力

电子化特征。新型电力系统具有发电单元多、单体容量小、交直流相互耦合等特点, 这些特点使得传统电网仿真分析技术的局限性日益凸显。高比例新能源接入情况下, 电力系统运行机理更加复杂, 故障不确

基金项目: 国家自然科学基金项目(61973072)

<http://www.cepc.com.cn>

定性更强,传统安全防御体系不具备灵活应对不确定性故障的能力,无法保障复杂故障条件下的电网安全运行,连锁脱网事故多次发生。暂态仿真通过故障还原,提高应对不确定性故障的能力,一定程度上保障了复杂故障条件下的电网安全运行,支撑了构建清洁、低碳、安全、高效的能源体系。

但是,目前尚缺乏认识其机理的有效模型和仿真工具^[1-6]。主要原因有:对新能源发电机技术研发持续投入、机组型号众多,且不断进行技术更新,通用化建模难度巨大。由于商业保密等原因,厂家提供的多为黑箱模型。风力发电机组的控制新技术快速发展、控制系统控制参数多、测试难度大、模型整定困难。模型的不准确使得电网运行方式更加保守,严重制约了新能源的消纳。

实际上,若对大电力系统进行全面的电磁暂态仿真,往往耗时很长。而对电力系统进行暂态分析时,一般也只是关注其中的某一部分相关变量的暂态变化过程,因此,可以只对“感兴趣”的部分网络进行详细的仿真,而对于其余部分网络(文献[7]中称之为“外部系统”)进行建模等效简化,可以加快暂态仿真的进程^[7]。

电力系统外部系统电磁暂态等值方法分为两类。一类方法是工频下的 ward 外部系统等值,这类方法是通过电力网络进行星网变换而获得。对于伪稳态运行的系统具有较高的等值精度。但是当系统发生不对称故障或者设备饱和时,系统中谐波分量丰富,尤其是需要研究系谐波信号的影响时,这种等值方法的误差比较大;而且该方法要求接口必须选在电压或电流数值相对稳定的节点处,否则仿真计算时易出现振荡^[8-12]。另一类是与频率相关的等值方法(frequency dependent network equivalents, FDNE)^[13-19],这类方法是在一个宽频段范围内对外部系统进行等值,使得在选定的频率范围内,等值系统对研究系统的作用和影响近似或接近于外部系统对研究系统的作用和影响。文献[13-18]提出了采用基于阻抗(导纳)状态空间表达式的矢量拟合(vector fitting, VF)等值算法。这类方法通过对外部系统进行频率采样,利用最小二乘法,求解系数矩阵为稠密矩阵的超定线性方程组,来获得状态空间表达式的相应系数矩阵。其等值网络能够在较宽频段内对外部系统均具有较高的近似度,但计算量较大,且所求得的极点可能出现不稳定极点。文献[19]提出了研究风电并网系统振荡问题的频域模式分析方法,使用外部系统阻抗网络模型描述目标系统,通过求取网络节点导纳矩阵和回路阻抗矩

阵的行列式零点,获得系统的振荡模式,并根据矩阵的左和右特征向量,计算出各节点和支路对振荡模式的参与因子、可观度和可控度指标。这种方法在一个较小频率范围内具有较好的等值效果;当频带较宽时,等值效果仍不够理想。

与频率相关的系统等值方法(例如文献[13-19])的核心问题是需要获得准确的状态空间表达式。确定-随机子空间(combined deterministic-stochastic identification, CDSI)在宽频段范围内是辨识状态空间表达式的方法。CDSI 是随机子空间(stochastic subspace identification, SSI)算法的提升方法。SSI 方法假定白噪声输入,仅利用输出信号,辨识状态空间表达式,在进行系统参数求解时无法建立确定的激励-系统-响应模型,存在主导模态提取困难,引入虚假模态^[20-22]的问题。CDSI 能利用输入(激励)和输出(响应)全部信息进行模态参数识别,建立确定的激励-系统-响应模型。防止系统特征值解空间的扩大,可以解决密集模态识别困难、虚假模态较多等问题,同时保留了 SSI 计算量小、极点稳定等优点,提高了状态空间表达式的辨识精度和等效模型的可靠性。

本文基于外部系统的输入和输出数据,利用 CDSI 对状态空间表达式的系数矩阵进行辨识,根据零极点构建 RLCG 等值电路,进行建模等效简化,实现了新型电力系统外部系统的等值构建。

1 方法原理

1.1 确定-随机子空间原理

1.1.1 CDSI 原理

CDSI 方法是将输入、输出数据组成特定的 Hankel 矩阵,计算 Hankel 矩阵的行空间投影,对投影进行奇异值分解,从而得到可观测矩阵和状态序列的卡尔曼滤波估计^[23-25],进而确定系统矩阵 A 、 B 、 C 、 D 。确定-随机系统可以表示为图 1。

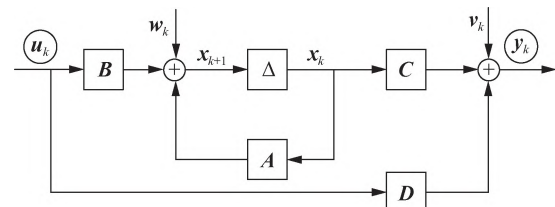


图 1 确定-随机系统

Fig. 1 Deterministic-stochastic identification

图 1 中 A 为状态矩阵, B 为输入矩阵, C 为输出矩阵, D 为传递矩阵, u 为输入数据, y 为输出数据, x 为状态向量, w 称为过程噪声, v 称为量测噪声。下

标 k 表示序列长度。

假设系统量测到的输入 U 、输出 Y 的时间间隔为 T_s , U 、 Y 分别为长度为 k 的序列, u_i 、 y_i 为 l 个通道在 i 时刻的观测向量。如果考虑上述随机因素的干扰,那么就得到确定-随机状态方程:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (1)$$

设噪声为白噪声序列,且协方差矩阵如下:

$$E\left[\begin{pmatrix} \mathbf{w}_p \\ \mathbf{v}_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{w}_q^T & \mathbf{v}_q^T \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} \mathbf{Q} & \mathbf{S} \\ \mathbf{S}^T & \mathbf{R} \end{pmatrix} \delta_{pq} \quad (2)$$

式中: $E(\cdot)$ 代表数学期望因子; δ_{pq} 代表 Kronecker 函数; \mathbf{Q} 、 \mathbf{S} 、 \mathbf{R} 为噪声序列的协方差矩阵。这样, CDSI 方法的基本目标是: 已知输入数据 u_0, u_1, \dots, u_k 和输出数据 y_0, y_1, \dots, y_k , 确定系统合适的阶次 n 后, 求得系统矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{S} 。下标 p 、 q 表示长度为 k 的序列中的任意项。

1.1.2 CDSI 算法流程

CDSI 算法的流程具体如下:

1) 通过输入、输出数据构建 Hankel 矩阵^[26]。

$$\begin{matrix} \text{"past"} \\ \\ \\ \text{"future"} \end{matrix} \mathbf{U}_{0i2i-1} = \begin{pmatrix} u_0 & u_1 & \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 & \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{i-1} & u_i & \cdots & u_{i+j-2} \\ u_i & u_{i+1} & \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} & \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} & \cdots & u_{2i+j-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{0i} \\ \mathbf{U}_{i2i-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{U}_f \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{U}_{0i2i-1} 下标的第一个数字代表 Hankel 矩阵左上角元素的时间系数, 下标第二个数字代表 Hankel 矩阵左下角元素的时间系数, 假设 $j \rightarrow \infty$; 将输入数据 Hankel 矩阵 \mathbf{U}_{0i2i-1} 分为两部分, 上部分称为“过去”输入, 用下标“p”表示, 即 \mathbf{U}_p ; 下部分称为“将来”输入, 用下标“f”表示, 即 \mathbf{U}_f 。同理, 输出的 Hankel 矩阵 \mathbf{Y}_{0i2i-1} 也用同样的方法定义。

定义输入和输出的 Hankel 矩阵的集合为 \mathbf{W}_{0i2i-1} , 则:

$$\begin{cases} \mathbf{W}_{0i-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_p \\ \mathbf{Y}_p \end{pmatrix} = \mathbf{W}_p \\ \mathbf{W}_{i2i-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_f \\ \mathbf{Y}_f \end{pmatrix} = \mathbf{W}_f \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{W}_p 为“过去”集合; \mathbf{W}_f 为“将来”集合。

2) 对 Hankel 矩阵进行 QR 分解:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{W}_p \\ \mathbf{W}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{R}_{11} & 0 \\ \mathbf{R}_{21} & \mathbf{R}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_1^T \\ \mathbf{Q}_2^T \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: \mathbf{R}_{11} 、 \mathbf{R}_{21} 、 \mathbf{R}_{22} 组成三角矩阵, \mathbf{Q}_1 、 \mathbf{Q}_2 组成正交阵。

3) 将输出 \mathbf{Y}_f 投影到输入和输出 \mathbf{W}_p 空间, 由空间投影的性质得出行空间的正交投影 \mathbf{P}_i :

$$\mathbf{P}_i = \frac{\mathbf{Y}_f}{\mathbf{W}_p} \quad (6)$$

4) 对投影矩阵 \mathbf{P}_i 进行奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 确定系统阶数:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (7)$$

式中: \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 为正交矩阵; \mathbf{S} 为降序排列的奇异值组成的对角矩阵。

理论上矩阵 \mathbf{S} 主对角线中非 0 元素个数就是模型阶数 n 。当受到噪声污染时, 非零奇异值的个数大于模型阶数 n , 但数值都很小。

利用奇异值的相对变化率, 即模型阶次指标 (model order indicator, MOI) 作为奇异值突降指标判断模型阶数 n 。奇异值突降指标记作 $M_{oi,i}$ 。

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_n \quad (8)$$

$$M_{oi,i} = \frac{\sigma_i - \sigma_{i+1}}{\sigma_{i+1}} \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (9)$$

式中: σ_i 为降序排列的奇异值。

设初始系统阶数为 N , 由于奇异值是降序排列的, 在突降点大的地方, 模型阶次指标 $M_{oi,i}$ 也是一个大值, 即 $M_{oi,i}$ 最大值对应的阶次为模型的阶数 n 。系统阶数 $N = n + 1$ (n 为模型阶数, 1 为噪声阶)。

5) 分解投影矩阵 \mathbf{P}_i 为可观矩阵 $\mathbf{\Gamma}_i$ 和卡尔曼滤波状态序列 $\hat{\mathbf{X}}_i$ 的乘积^[27]:

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{\Gamma}_i \hat{\mathbf{X}}_i \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_i = (\hat{x}_i, \hat{x}_{i+1}, \dots, \hat{x}_{i+j-1}) \quad (11)$$

$$\mathbf{\Gamma}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{CA} \\ \vdots \\ \mathbf{CA}^{i-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中: \hat{x}_i 为状态序列; \mathbf{A} 、 \mathbf{C} 为系统状态矩阵。

6) 使用卡尔曼滤波状态序列和输入输出代入状态空间方程求得系统状态矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 和残差矩阵 \mathbf{p}_w 、 \mathbf{p}_v 。

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{11,i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i \\ \mathbf{U}_{11,i} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{p}_w \\ \mathbf{p}_v \end{pmatrix} \quad (13)$$

求系统状态矩阵 \mathbf{A} 的特征值 λ ($i = 1, 2, \dots, n$), 进而可获得频率 f'_i 。

1.2 等值模型

用 y_k 表示电流 I ; u_k 表示电压 U 。状态空间表达式 $Y(s)$ 为:

$$Y(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = C(sE - A)^{-1}B + D \quad (14)$$

式中: A 、 B 、 C 、 D 为已知的系数矩阵; E 为单位矩阵; $I(s)$ 、 $U(s)$ 、 $Y(s)$ 为频域下输入、输出及对应关系,其中 s 是频域下的自变量。

将式(14)转化为频域表达式,其中 $m \geq n$:

$$Y(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}{1 + b_1s + b_2s^2 + \dots + b_ms^m} \quad (15)$$

式中: a_n 、 b_m 为降幂排列项系数,下同。

p_i 表示实数极点; $p'_k \pm jp''_k$ 表示复数极点,可将式(15)写为:

$$Y(s) = \frac{a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots + a_ns^n}{\prod_{i=1}^q (s - p_i) \prod_{k=1}^r [(s - p'_k - jp''_k)(s - p'_k + jp''_k)]} \quad (16)$$

裂项得:

$$Y(s) = \sum_{i=1}^q \frac{c_i}{s - p_i} + \sum_{k=1}^r \left(\frac{c'_k + jc''_k}{s - (p'_k + jp''_k)} + \frac{c'_k - jc''_k}{s - (p'_k - jp''_k)} \right) \quad (17)$$

在得到外部系统电流和电压的传递函数后,可用 3×3 简单网络代替外部系统,则该网络可作为外部系统的等值系统。并联等值模型如图 2 所示。

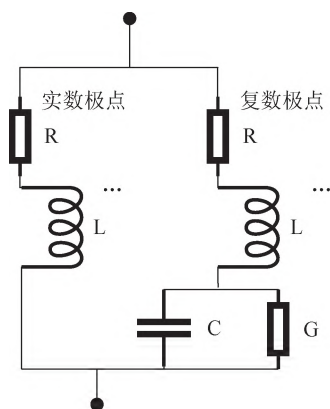


图 2 并联等值模型

Fig. 2 Parallel equivalent model

在图 2 中,实数极点对应 RL 支路:

$$Y_{RL}(s) = \frac{1}{R + sL} \rightarrow \frac{c_i}{s - p_i} \quad (18)$$

$$L_1 = \frac{1}{c_i} \quad (19)$$

$$R_1 = -\frac{p_i}{c_i} \quad (20)$$

式中: $Y_{RL}(s)$ 为 RL 支路对应关系; R 、 L 、 C 、 G 为等效支路元件参数,下同。

复数极点对应 RLCG 支路:

$$Y_{RLCG}(s) = \frac{1}{R + sL + 1/sC + 1/G} \rightarrow \frac{c'_k + jc''_k}{s - (p'_k + jp''_k)} + \frac{c'_k - jc''_k}{s - (p'_k - jp''_k)} \quad (21)$$

$$L = \frac{1}{2c'_k} \quad (22)$$

$$R = [-2p'_k + 2(c'_k p'_k + c''_k p''_k)]L \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{[p'^2_k + p''^2_k + 2(c'_k p'_k + c''_k p''_k)]R}L \quad (24)$$

$$G = -2(c'_k p'_k + c''_k p''_k)CL \quad (25)$$

2 基于 CDSI 的外部系统等值方法流程

本文的方法包括 CDSI 辨识态空间表达式和构建 RLCG 等值电路两部分。

2.1 CDSI 部分

CDSI 部分的流程具体如下:

- 1) 初始化 CDSI, 构造确定-随机状态方程和噪声协方差矩阵。
- 2) 利用划定为外部系统的电压、电流采样数据构建 Hankle 矩阵。
- 3) 将卡尔曼滤波状态序列和输入输出代入状态空间方程,求得系统状态矩阵 A 、 B 、 C 、 D 。

2.2 RLCG 等值部分

RLCG 部分的流程具体如下:

- 1) 将状态空间表达式转化为频域形式,求解系统零极点。
- 2) 将实数极点和复数极点分别对应其等效支路,构建外部系统等效电路图。

2.3 本文等值方法流程图

本文 CDSI 等值方法流程图如图 3 所示。

3 仿真实验和对比分析

3.1 仿真实验

以 IEEE 14 节点系统电网结构为例进行仿真分析,该拓扑图包含:14 条母线,2 台发电机,3 台同步电动机,11 个负荷点,20 条输电线路和 40 个断路器^[28]。在 IEEE 14 标准测试电力系统中节点 14 处,接入永磁直驱风电机组,组成分布式风电场,参数如表 1 所示^[29]。仿真中,在风电场内部设置故障,将风电场视为内部系统,IEEE 14 标准测试电力系统视为外部系统。具体接线如图 4 所示。

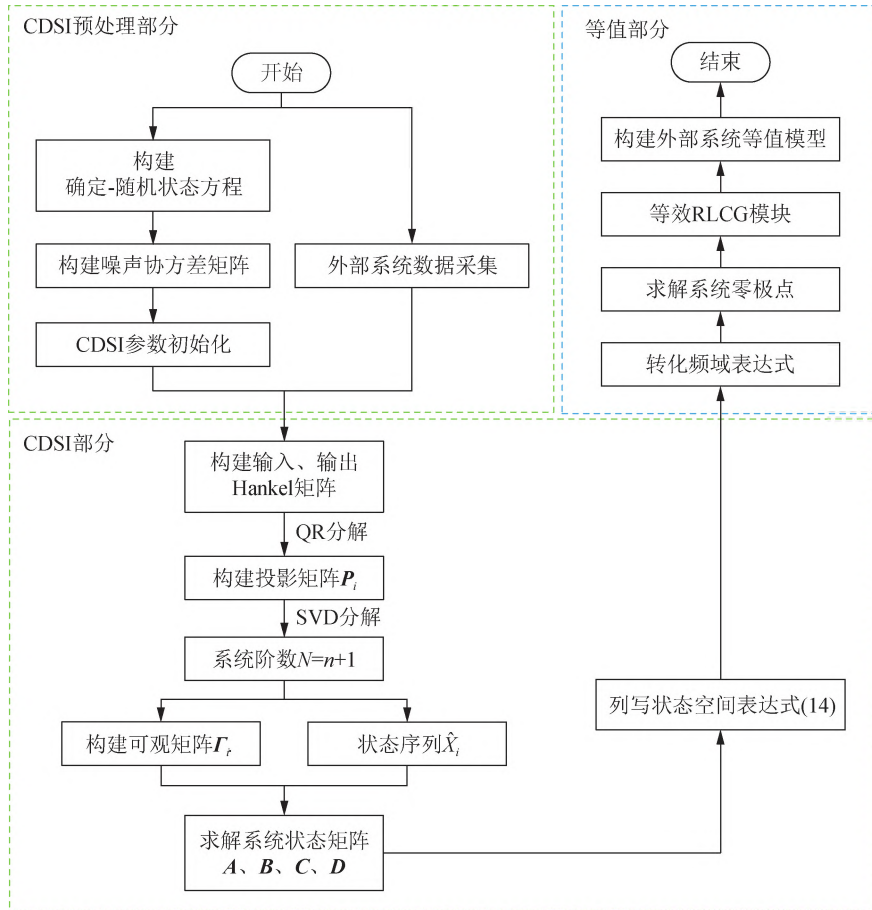


图 3 CDSI 等值方法流程图
Fig. 3 CDSI equivalent method flowchart

表 1 永磁直驱风电机组参数
Table 1 PMSG parameters

参数名称	参数值
空气密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.237
风轮机惯性时间常数 H_m / s	6.2
发电机惯性时间常数 H_e / s	1.0
轴系阻尼系数 $D / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	5×10^3
轴系刚性系数 $K / (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$	5×10^6
桨距控制系统的惯性时间常数 T_{se} / s	0.01
发电机的输出功率 P_c / MW	1.5
定子电阻 R_s / Ω	0.028
定子线圈电感 L_s / mH	1.121
发电机电极对数 p	48
直流环节电容 C_g / mF	33.2
网侧电抗器电感 L_g / mH	0.22

当风电场稳定运行后,在所连母线 15 设置持续 0.05 s 的三相瞬时性短路接地故障,引起分布式风电场功率振荡。

取节点 14 切除故障后、恢复稳定运行前三相电压、电流暂态数据。

构建 CDSI 状态方程,通过确定-随机子空间辨

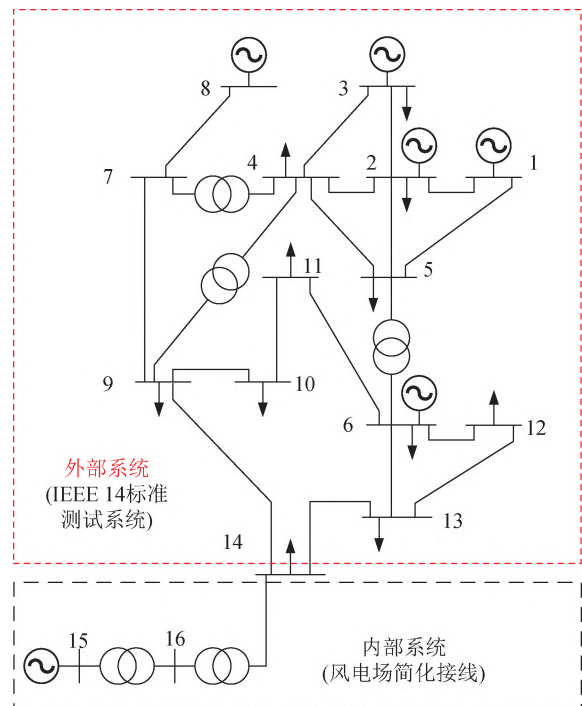


图 4 接入风电机组的 IEEE 14 节点系统
Fig. 4 IEEE 14-node bus system connected to wind power

识,SVD 分解得模型阶次指标 $M_{oi,i}$,如图 5 所示。

由图 5 确定,模型阶数 n 为 6,系统阶数 N 为 7。使用卡尔曼滤波状态序列和输入输出代入状态空间

方程式(13)求得系统状态矩阵 A 、 B 、 C 、 D ,其中系统矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1.0073 & -0.0139 & -0.0094 & -0.0035 & 0.0520 & 0.0658 & -0.0381 \\ 0.0118 & 0.9975 & 0.0154 & -0.0716 & 0.0267 & 0.0070 & 0.0552 \\ 0.0075 & -0.0017 & 0.9877 & -0.0154 & -0.0366 & 0.0364 & -0.0454 \\ -0.0085 & 0.0517 & 0.0293 & 0.9717 & -0.0248 & 0.0519 & 0.1223 \\ -0.0059 & -0.0052 & 0.0089 & 0.0498 & 0.9808 & -0.0762 & 0.0025 \\ 0.0002 & 0.0031 & -0.0225 & -0.0643 & -0.0188 & 0.5535 & -0.0665 \\ 0.0073 & -0.0075 & -0.0002 & -0.1216 & -0.0236 & 0.5863 & 0.4526 \end{bmatrix} \quad (26)$$

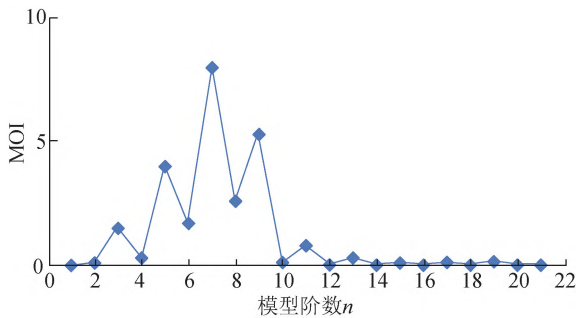


图 5 模型阶次指标 MOI 曲线

Fig. 5 The curve of the model order indicator

根据 CDSI 辨识结果按照式(14)构建状态空间表达式,并转化为频域形式式(15),求解零极点并裂项式(16)–(17),将 1 组实数极点项和 3 组复数极点项按照式(18)–(25)构建 RLCG 等值电路,结果如图 6 所示,实现了外部系统暂态等值构建。

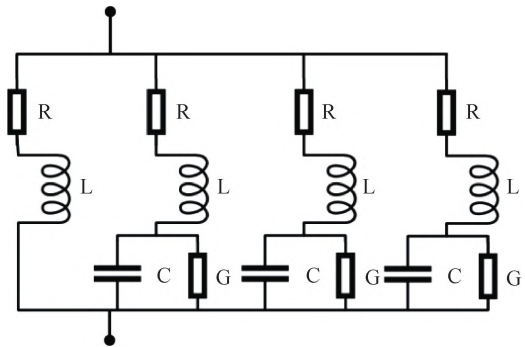


图 7 CDSI 算法 A-A 相 RLCG 等值电路

Fig. 7 A-A phase RLCG equivalent circuit of CDSI

表 2 CDSI 算法 A-A 相 RLCG 等值电路参数

Table 2 A-A phase RLCG equivalent circuit parameters of CDSI

极点	支路	R/Ω	L/H	$C/\mu F$	G/s
实数极点	支路 1	483.168 3	4.875 336		
	支路 2	3 316.864	3.435 239	0.119 953	-0.121 689
复数极点	支路 1	4 326.721	4.272 703	0.029 778	-0.028 625
	支路 3	3 104.267	3.634 688	5.24×10^{-4}	-7.97×10^{-5}

2) 采用 VF 方法^[12-16],将上例中采集的电压、电流暂态数据组成一个超定线性方程组:

$$y(s_i) = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{s - a_i} + d + sh \quad (27)$$

式中: h 和 d 表示一次项参数和常数。

通过求解线性方程组的最小二乘解可以获得新的极点,经过 6 次迭代后结果收敛,获得误差范围内的近似解 a_i 、 c_i 、 d 和 h ,获得传递函数式(13)。

将 SSI、VF 算法所得到的传递函数,分别采用本文 RLCG 等值方法,对外部系统进行等值计算而获得了相应的 3 输入 3 输出的等值网络。其中 SSI 的 A-A 相等值电路及相关参数如图 8 和表 3 所示,VF 方法的如图 9 和表 4 所示。

用等效后的外部系统(见图 6)替换原标准 IEEE 14 节点系统电网,分别对比 CDSI 与 SSI、VF 算法等

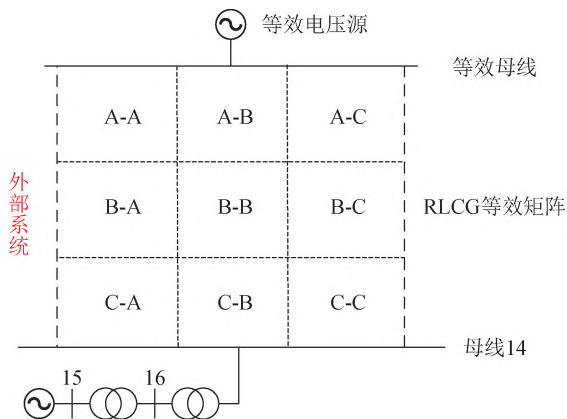


图 6 电力系统外部系统暂态等值结构

Fig. 6 Transient equivalent structure of the external system of the power system

其中以 A-A 相为例,其等效电路图如图 7 所示,相关参数见表 2。

3.2 对比分析

1) 采用 SSI 方法^[18],假定输入为白噪声,输出为上例中采集的电压暂态数据,构建 Hankle 矩阵并进行奇异值分解,求得系统矩阵 A 和 C 之后,获得传递函数式(12)。

效前后风力发电机故障后 0.1 s 电磁转矩, 结果见图 10。

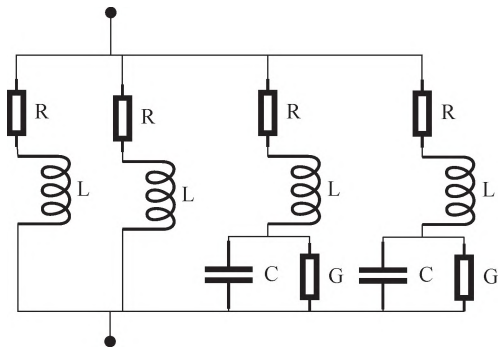


图 8 SSI 算法 A-A 相 RLCG 等值电路

Fig. 8 A-A phase RLCG equivalent circuit of SSI

表 3 SSI 算法 A-A 相 RLCG 等值电路参数

Table 3 A-A phase RLCG equivalent circuit parameters of SSI

极点	支路	R/Ω	L/H	$C/\mu F$	G/s
实数	支路 1	485.908 6	4.916 757		
极点					
复数	支路 1	2 921.964	2.776 942	0.138 076	-0.157 649
极点	支路 2	3 641.098	3.406 543	0.033 847	-0.026 569

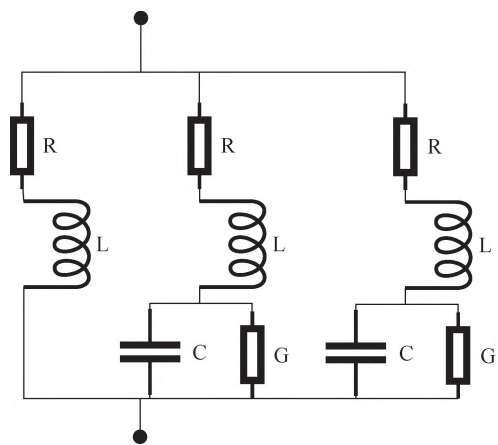


图 9 VF 算法 A-A 相 RLCG 等值电路

Fig. 9 A-A phase RLCG equivalent circuit of VF

表 4 VF 算法 A-A 相 RLCG 等值电路参数

Table 4 A-A phase RLCG equivalent circuit parameters of VF

极点	支路	R/Ω	L/H	$C/\mu F$	G/s
实数	支路 1	483.167 7	4.875 321		
极点	支路 2	-3.18×10^{-9}	-7.97×10^{-4}		
复数	支路 1	3 974.538	3.774 213	0.083 543	-0.063 693
极点	支路 2	7.97×10^{-9}	3.18×10^{-4}	5.24×10^{-4}	-7.97×10^{-5}

分别计算电磁转矩的均方根误差 (root mean square error, RMSE)、平均绝对误差 (mean absolute

error, MAE)、平均相对误差 (mean relative error, MRE) 以及拟合优度 (R^2), 其结果见图 10 和表 5。

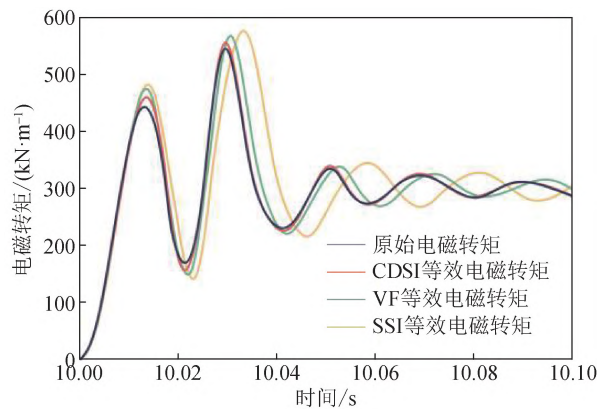


图 10 电磁转矩对比图

Fig. 10 Electromagnetic torque comparison

表 5 电磁转矩误差

Table 5 Electromagnetic torque error

方法	RMSE	MAE	MRE	R^2
SSI	36.735 4	20.561 3	0.033 1	0.897 7
VF	14.245 3	8.476 4	0.013 7	0.979 2
CDSI	5.703 1	3.846 9	0.006 2	0.993 5

结合图 10 和表 5 可以得到, CDSI 等值方所得到的风机电磁转矩曲线与未等值时的电磁转矩曲线几乎完全重合, 误差参数最优, 拟合度最高, 可以获得准确的外部系统的暂态等值建模, 优于 VF 和 SSI 方法。

VF 方法计算量大, 在求解暂态信号中出现了不稳定节点。而 SSI 方法仅利用输出信号, 对主导模式提取时出现了虚假模式, 使得最终结果误差较大。

4 实例分析

2015 年某月, 我国某风电场发生脱网事故, 导致 300 km 外火发电机组的转轴扭振保护 (torsional tress relay, TSR) 动作^[30], 引起火发电机组停运。

根据录波数据和事故报告, 由于风电场内部发生次同步振荡并在多级电网中传播引起电网功率振荡, 火电机组扭振保护装置动作, 造成机组跳闸, 最终使电网频率由 50.05 Hz 降低至 49.91 Hz。为简化系统, 方便分析风电场内部的次同步振荡形成机理, 将故障风电场划分为内部系统。对其余的外部系统进行等值简化, 其电网结构如图 11 所示。

已获得了故障后该地区风电场 110 kV 母线三相电压、电流 60 s 内的录波结果。限于篇幅, 文中仅给出 A 相的电压和电流的录波结果, 如图 12、13 所示, 采样频率为 12.8 kHz。取波动明显的 25~31 s 数据进行分析。

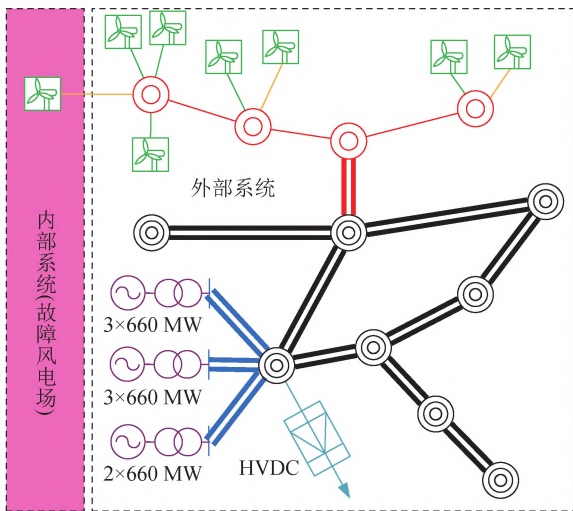


图 11 电网拓扑结构图
Fig. 11 Grid topology diagram

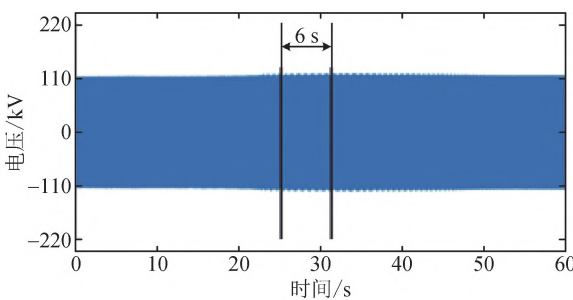


图 12 电压录波结果
Fig. 12 Voltage recording results

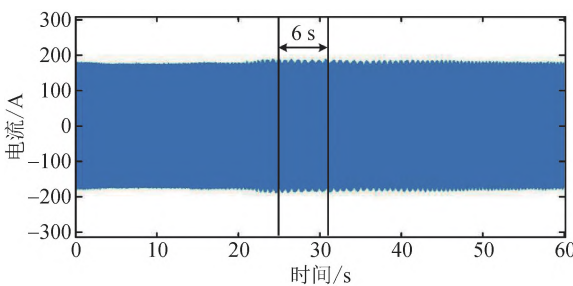


图 13 电流录波结果
Fig. 13 Current recording results

取 25~31 s 的电压和电流数据,利用本文的 CDSI 辨识等值方法,对量测数据进行参数辨识,获得状态空间表达式及传递函数,按零极点构建外部系统的 RLCG 等值电路,得到外部系统等值模型。

重构电流输出信号,其电流输出结果和局部放大如图 14、15 所示,分别对比 CDSI、SSI、VF 算法输出结果如图 16 所示,输出电流的误差结果如表 6 所示。

对比本文 CDSI 外部系统等值结果与未等值前采样获得的电流数据,其边界处三相电流曲线误差小

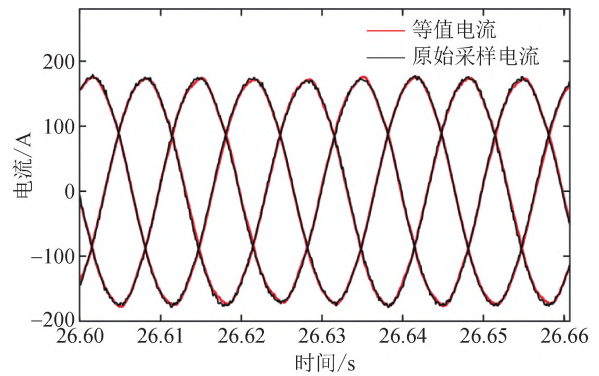


图 14 电流输出结果
Fig. 14 The current output results

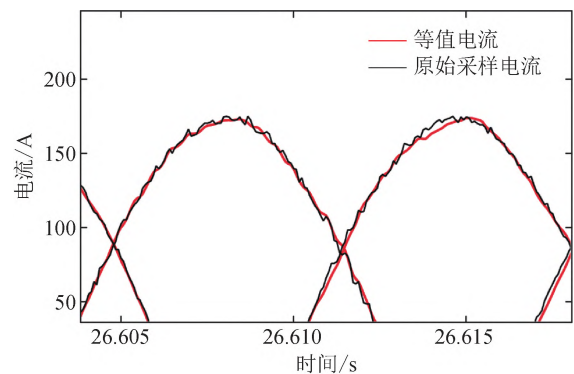


图 15 电流输出结果局部放大
Fig. 15 The current output results are locally amplified

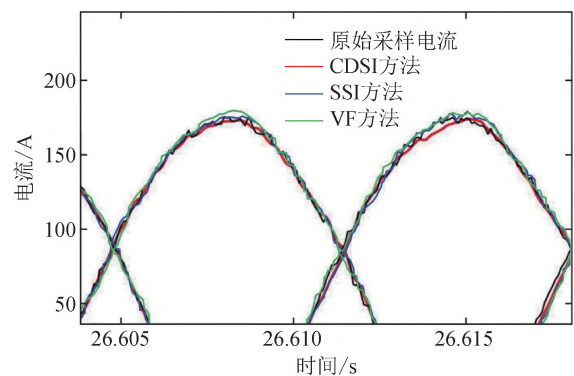


图 16 电流输出结果对比
Fig. 16 Comparison of current output results

表 6 电流输出的误差值
Table 6 The error value of the current output

方法	RMSE	MAE	MRE	R^2
SSI	10.739 8	4.759 6	0.042 6	0.893 5
VF	2.876 3	1.576 4	0.015 2	0.980 6
CDSI	0.573 2	0.336 4	0.007 3	0.994 1

于±1%,其拟合优度(R^2)高于99%。在计算复杂性上,量测数据共计76 800×6个,SSI与本文CDSI方法计算速度相同,平均计算时间80~90 s。VF方法需要先进行等间隔采样,然后迭代求解超定线性方程

组,计算量较大,速度较慢,平均计算时间超过1 000 s。

利用本文方法获得的外部系统电磁暂态等值模型具有很高的等值精度,解决了新能源机组型号多样、商业保密等原因造成的建模困难,同时也为后续故障还原、事故分析打下坚实基础。

5 结 论

本文针对以新能源为主体的新型电力系统,提出了一种基于 CDSI 的外部系统暂态等值方法。

1)利用本文方法将除故障外的其他部分划分为外部系统进行等效,可以缩短仿真耗时,加快仿真进程,高效准确地进行故障还原和事故分析。

2)CDSI 利用输入和输出的全部信息获得系统状态空间模型,能够准确反映外部系统的频域特性,模型具有很高的等值精度,高于仅利用输出信息的 SSI 方法。

将电力系统进行外部系统等效后,下一步重点是解决内部系统模型等值,为故障还原、事故分析和扰动源定位等问题提供依据。

6 参 考 文 献

- [1] 别朝红,任彦哲,李更丰,等."双碳"目标下城市能源系统的形态结构和发展路径[J].电力系统自动化,2022,46(17):3-15.
BIE Zhaohong, REN Yanzhe, LI Gengfeng, et al. Morphological structure and development path of urban energy system for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 3-15.
- [2] 杨鹏,刘锋,姜齐荣,等."双高"电力系统大扰动稳定性:问题、挑战与展望[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):403-414.
YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.
- [3] 李庭瑞,罗睿,李锐,等.电力卫星物联网主动安全防御技术研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(12):55-60.
LI Tingrui, LUO Rui, LI Rui, et al. Research on active security defense technology of power satellite internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12): 55-60.
- [4] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(15):4720-4732.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [5] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [6] 王皓怀,汤涌,侯俊贤,等.潮流计算和机电暂态仿真中风光储联合发电系统的实用等值方法[J].中国电机工程学报,2012,32(1):1-8,25.
WANG Haohuai, TANG Yong, HOU Junxian, et al. Equivalent method of integrated power generation system of wind, photovoltaic and energy storage in power flow calculation and transient simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 1-8, 25.
- [7] 林济铿,闫贻鹏,刘涛,等.电力系统电磁暂态仿真外部系统等值方法综述[J].电力系统自动化,2012,36(11):108-115.
LIN Jikeng, YAN Yipeng, LIU Tao, et al. Review on external system equivalent method for electromagnetic transient simulation of power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 108-115.
- [8] 夏道止.电力系统分析(下册)[M].北京:水利电力出版社,1995:11.
- [9] 张伯明,陈寿孙.高等电力网络分析[M].北京:清华大学出版社,1996:325-331.
- [10] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等.互联系统电磁暂态交互作用研究,II:交流侧系统等值及稳态调试[J].高电压技术,2011,37(3):537-547.
CHEN Shuiming, HUANG Lulu, XIE Haibin, et al. Transient interaction of HVAC and HVDC in converter station in HVDC, II: equivalence circuit in AC side and steady-state debugging [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 537-547.
- [11] 孙宏斌,张伯明,相年德. Ward 型等值的非线性误差分析与应用[J].电力系统自动化,1996,20(9):12-16.
- [12] 王晨轩,汪震.含异步风力发电机的频率相关网络等值方法研究[J].分布式能源,2019,4(5):35-41.
WANG Chenxuan, WANG Zhen. Research on frequency dependent network equivalent in power systems with asynchronous wind turbine generator [J]. Distributed Energy, 2019, 4(5): 35-41.
- [13] LIN J K, YAN Y P, PU T J, et al. A new method of frequency-dependent network equivalence for power system [J]. Science China Technological Sciences, 2012(7): 1894-1907.
- [14] WATSON N R, ARRILLAGA J. Frequency-dependent AC system equivalents for harmonic studies and transient convertor simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1196-1203.
- [15] IBRAHIMA A I, SALAMA M M A. Frequency dependent network equivalents for electromagnetic transient studies [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1999, 21(6): 395-404.
- [16] LEE S J, SONG S Y. Time-series analysis of the effects of building and household features on residential end-use energy [J]. Applied Energy, 2022, 312: 118722.
- [17] RAMIREZ A. Vector fitting-based calculation of frequency-dependent network equivalents by frequency partitioning and model-order reduction [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 410-415.

- [18] 李世琼,宗伟. 线性定常系统状态空间表达式的电路模型[C]// 第四届全国高等学校电气工程及其自动化专业教学改革研讨会论文集(下册).[出版者不详],2007:82-84.
- [19] 占颖,吴琛,谢小荣,等. 风电并网系统次同步振荡的频域模式分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 90-97.
ZHAN Ying, WU Chen, XIE Xiaorong, et al. Frequency domain modal analysis of subsynchronous oscillation in grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 90-97.
- [20] 王志远,龙呈,常晓青,等. 基于FCM聚类的随机子空间低频振荡模态识别算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 69-75.
WANG Zhiyuan, LONG Cheng, CHANG Xiaoqing, et al. Recognition algorithm for low-frequency oscillation mode through stochastic subspace based on FCM clustering[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 69-75.
- [21] 胡异丁,李丹,任伟新,等. 基于延时随机子空间方法的非白噪声环境激励结构模态参数识别[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 71-76.
HU Yiding, LI Dan, REN Weixin, et al. Modal parameter identification of structures under non-white noise ambient excitations using delay-index-based stochastic subspace method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8): 71-76.
- [22] 常军,张启伟,孙利民. 随机子空间产生虚假模态及模态遗漏的原因分析[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 57-62.
CHANG Jun, ZHANG Qiwei, SUN Limin. Analysis how stochastic subspace identification brings false modes and mode absence[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11): 57-62.
- [23] MUSSOT V, MERCÈRE G, DAIRAY T, et al. Noise covariance matrix estimation with subspace model identification for Kalman filtering[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2021, 35(4): 591-611.
- [24] 马志赛. 线性时变结构模态参数仅输出递推辨识方法研究[D]. 北京:北京理工大学, 2017.
MA Zhisai. Research on recursive identification method of modal parameters output only for linear time-varying structures [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [25] 郭凡. 非线性变量误差系统的辨识方法研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
GUO Fan. Research on identification method of nonlinear variable error system[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [26] VAN OVERSCHEE P, DE MOOR B. Two subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems [C]// Proceedings of the 31st IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2002: 511-516.
- [27] VAN OVERSCHEE P, DE MOOR B L. Subspace identification for linear systems: theory, implementation, applications [M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [28] ADITYA MISHRA, RAYMOND DE CALLAFON. PMU measurements from optimal/ sub optimal locations in IEEE 14 bus system[DB/OL]. [2022-10-01]. IEEE Dataport. <https://dx.doi.org/10.21227/em4w-n470>.
- [29] 王森,赵峰. 基于同伦函数的直驱永磁同步风电机组次同步振荡特征值分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(9): 89-96.
WANG Miao, ZHAO Feng. Eigenvalue analysis on sub-synchronous oscillation of direct-drive permanent magnet synchronous wind turbine generator based on homotopy function [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(9): 89-96.
- [30] 刘朋印,谢小荣,白正宇,等. 基于暂态扭矩辨识的汽轮机组快速扭振保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6649-6658.
LIU Pengyin, XIE Xiaorong, BAI Zhengyu, et al. Design of fast torsional vibration protection for turbine generators based on transient torque estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6649-6658.

收稿日期: 2022-10-31

作者简介:

赵妍(1974),女,博士,副教授,主要研究方向为电力系统稳定分析和控制、电力系统故障分析和信号处理, E-mail: zjb_112006@163.com;

柳旭(1998),男,硕士,通信作者,主要研究方向为人工智能在电力系统的应用, E-mail: 547337414@qq.com;

孙硕(1996),男,硕士,主要从事继保检修工作, E-mail: 3071288044@qq.com;

朱建华(1986),男,高级工程师,主要研究方向为励磁系统稳定与电能质量分析, E-mail: 948970197@qq.com;

聂永辉(1970),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: yonghui_n@aliyun.com。

(编辑 魏希辉)