

基于 MATLAB/Simulink 的新一代电力系统 动态仿真工具箱

林思齐, 熊永新, 姚伟, 艾小猛, 文劲宇

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

MATLAB/Simulink-based Dynamic Simulation Toolbox for New Generation Power System

LIN Siqi, XIONG Yongxin, YAO Wei, AI Xiaomeng, WEN Jinyu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: With the transformation of the world's energy structure, the power system is transforming to a new generation with a high proportion of new energy and power electronic equipment. Modeling has become the foundation to study the dynamic features and control strategies of the new generation power system. However, the existing power system software, with its disadvantages such as difficulty in modeling and lack of flexibility, is not suitable for the new generation of power system modeling. This paper develops a MATLAB/Simulink-based dynamic simulation toolbox for the new generation power system. This toolbox can conveniently simulate the new generation power system with renewable energy and DC grid. It has the advantages of portability, modularization and openness. It can also make full use of the various toolboxes in MATLAB for modal analyzing and controller designing. After introducing the core idea of simulating and modeling in the toolbox, the correctness and accuracy of the toolbox is verified through taking the wind power integration via a four-terminal DC grid system as an example and comparing the simulation result of electromechanical model in the proposed toolbox with the electromagnetic transient model in Simscape. Finally, the simulation results of an AC/DC hybrid grid with wind farm system show that the toolbox can accurately reflect the dynamics of the equipment models in the system. It is easy to carry out the small-signal analysis and analyze oscillations. It proves that the toolbox is suitable to study the control and dynamics of the new generation power system.

KEY WORDS: MATLAB/Simulink; new generation power system; DC-grid; wind power; dynamic modeling; toolbox

摘要: 随着世界能源结构的转型, 电力系统向着具有高比例

新能源和高比例电力电子装备接入的新一代电力系统转型。建模是研究新一代电力系统动态特性与控制策略的基础。而现有电力系统软件存在自定义模型困难, 不够灵活的缺点。难以适用于新一代电力系统的建模, 基于此, 文章开发了一种基于 MATLAB/Simulink 的新一代电力系统动态仿真工具箱。该工具箱可方便地实现含新能源和直流输电的新一代电力系统的仿真, 具有可移植、模块化、开放式等优点, 还可以充分利用 MATLAB 中的各种工具箱进行模态分析和控制器设计。文章在详细阐述该工具箱仿真建模核心思路的基础上, 以风电经四端直流电网并网系统为例, 通过对比所开发工具箱中建立的动态模型与在 Simscape 建立电磁暂态模型的仿真结果, 验证所开发工具箱的正确性和准确性, 最后, 对带风电场的交直流混联系统的仿真分析结果表明, 该工具箱能准确反映系统内各设备模型动态, 方便地得到小干扰分析结果并进行振荡分析, 适合于新一代电力系统的控制与动态分析方面的研究。

关键词: MATLAB/Simulink; 新一代电力系统; 柔性直流电网; 风电; 动态建模; 工具箱

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0969

0 引言

近年来, 随着世界能源结构转型, 相比依赖化石能源, 以大机组、超高压、大电网为特点的第二代电力系统, 新一代电力系统呈现高比例可再生能源接入和高比例电力电子装备应用等特点, 并与物理信息, 人工智能等深度融合^[1]。因此, 面临着一系列涉及惯量^[2]、频率^[3]和振荡^[4]的问题, 需要从时域与频域分析。建模是进行研究的基础, 一方面, 研究要求模型能包含新能源, 换流器等多种设备, 能反映多个交、直流电网的系统整体动态。另一方面, 为解决这些问题, 如模糊控制、神经网络控制^[5]等各种先进控制算法被研究人员尝试。而常用的商业软件, 如 PSASP^[6], PSS/E^[7]等, 计算容量大、

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(52022035)。

Project Supported by the Outstanding Youth Science Foundation of National Natural Science Foundation of China (52022035).

借鉴了 MatDyn 的设计经验, 利用 MATA CDC^[18] 进行潮流计算, 将初始化过程放置在 MATLAB 中, 通过 m 文件编程计算出模型状态变量初始值, 模型的初始化过程可分为 3 步。首先, 在 MATA CDC 或其他潮流计算软件中, 输入系统网络结构与定解条件。得到含网络结构和各节点电压的潮流计算结果。接着, 在初始化文件中, 输入设备模型参数, 如双馈风机的定转子互感等。最后, 初始化程序利用潮流计算结果与模型参数, 计算出模型状态变量的初始值, 并将初始值与模型参数赋给建立在 Simulink 的设备模型中, 完成初始化。

本工具箱在 Simulink 中完成动态仿真。这样能够利用其多样模块在图形化界面中构建出系统方程。在初始化完成后, 选择合适的 Simulink 仿真参数, 即可利用 Simulink 中 16 种求解器进行动态仿真。在自定义建模时, 可先分块建立设备模型或模型中某个部分, 在能够正常初始化和验证对比后, 再加入网络当中仿真, 提高了自定义模型的效率。而目前已有小型仿真工具箱在添加模型时须选取状态变量, 并修改数值算法文件以求解新增模型中

的状态变量, 增大了自定义模型的难度, 也难以实现模型的分块测试。

目前, 工具箱中已经集成了同步电机及其配套设备(电力系统稳定器, 励磁系统, 调速器)^[17], 交流电网, 直流网络, 双馈风机, 柔直换流器等, 初步满足应对新一代电力系统的仿真需要。工具箱与其他常用工具箱的对比如表 1 所示。

2 建模基本原理

2.1 全系统数学方程

工具箱通用整体建模结构如图 3 所示。为简化关系, 没有详细列出各元件的内部结构。在仿真中, 忽略交流网络和电机定子的电磁暂态过程后, 可列出全系统暂态方程的一般形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f 为系统的状态方程, 主要为反映元件动态的微分方程; g 为系统代数方程, 主要为网络方程; x 为系统状态变量向量; y 为系统运行变量向量。

表 1 本文所开发工具箱与现有主流工具箱功能对比										
时域			线性化			灵活性			难度	
求解算法	查看输出	线性化工具	可得 ABCD 阵	自定义模型线性化难度		结合新算法	模型分块测试	是否需考虑与求解器交互	GUI	代码复杂度
MatDyn	5 种	编程		×		中等	困难	需要	×	中等
PSAT	2 种	部分编程	√	×	中等	较困难	困难	无需	√	复杂
PST	1 种	编程	√	√	困难	困难	困难	需要	×	复杂
本工具箱	17 种	无需编程	√	√	简单	简单	简单	无需	√	简单

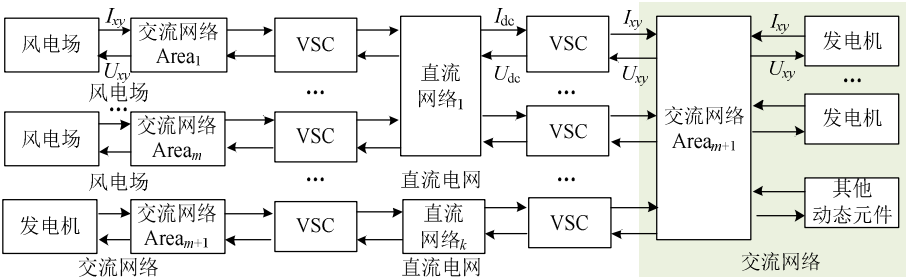


图 3 工具箱内模型通用结构
Fig. 3 Structure model built in toolbox

2.2 交流网络分块建模

如图 3 所示, 各异步交流系统间通过直流电网互联, 无交流联络线, 各区域间互导纳为 0。对交流节点分区编号后, 采用两相直角坐标系的交流网络导纳矩阵可表示为式(2)。

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{a1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{a2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{Y}_{an} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{Y} 为整体交流电网的导纳矩阵; $\mathbf{Y}_{a1} \sim \mathbf{Y}_{an}$ 为区域 1~n 的交流网络的导纳矩阵。

为使工具箱内的交流网络结构易于修改, 工具箱中将整体交流网络导纳矩阵 \mathbf{Y} 按区域分割成多个导纳矩阵 $\mathbf{Y}_{a1} \sim \mathbf{Y}_{an}$ 。这样, 在新增交流网络区域时, 无需修改原有导纳矩阵, 直接增加存储着新网络导纳矩阵 $\mathbf{Y}_{a(n+1)}$ 的模块即可完成系统结构修改。

工具箱采用恒阻抗负荷模型, 利用潮流计算结果, 计算出负荷对应导纳, 加入 \mathbf{Y}_{an} 对应负荷节点

的自导纳中, 得到包含负荷导纳的矩阵 \mathbf{Y}_L 。这样, 负荷节点被转化为联络节点。

当某个交流区域的节点总数为 m 时, 将连接注入电流模型(包括发电机, 风机, 换流器和动态负荷)的节点编为 $1 \sim k$, 联络节点编为 $k+1 \sim m$, 即可将 \mathbf{Y}_L 分块写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_E \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{EE} & \mathbf{Y}_{EN} \\ \mathbf{Y}_{NE} & \mathbf{Y}_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{U}_E \\ \mathbf{U}_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

为降低矩阵维数, 提高计算效率。利用式(4)将 \mathbf{Y}_L 转换成 \mathbf{Y}_E 。

$$\begin{cases} \mathbf{I}_E = (\mathbf{Y}_{EE} - \mathbf{Y}_{EN} \mathbf{Y}_{NN}^{-1} \mathbf{Y}_{NE}) \mathbf{U}_E = \mathbf{Y}_E \mathbf{U}_E \\ \mathbf{U}_N = -\mathbf{Y}_{NN}^{-1} \mathbf{Y}_{NE} \mathbf{U}_E \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{U}_E 为元件端电压矢量; \mathbf{U}_N 为联络节点电压矢量; \mathbf{I}_E 为元件注入电流矢量; \mathbf{Y}_{EE} , \mathbf{Y}_{NN} 为发电机节点和联络节点内部的自、互导纳矩阵; \mathbf{Y}_{EN} , \mathbf{Y}_{NE} 为发电机和联络节点之间的互导纳矩阵。

2.3 柔直换流站建模

目前, 柔直换流站常采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)结构。为更充分地考虑 MMC 桥臂电感对直流动态的影响, MMC 直流侧方程采用二阶方程, 其标么值方程可写为

$$\begin{cases} \frac{L_{arm}}{2\omega_B} \frac{di_{sx}}{dt} = u_{sx} - u_{cx} - \frac{1}{2} R_{arm} i_{sx} + \frac{1}{2} \omega_l L_{arm} i_{sy} \\ \frac{L_{arm}}{2\omega_B} \frac{di_{sy}}{dt} = u_{sy} - u_{cy} - \frac{1}{2} R_{arm} i_{sy} - \frac{1}{2} \omega_l L_{arm} i_{sx} \\ \frac{2L_{arm}}{3\omega_B} \frac{di_{dc}}{dt} = u_{dc} - u_{Ceq} - \frac{2}{3} R_{arm} i_{dc} \\ \frac{C_{eq}}{\omega_B} \frac{du_{Ceq}}{dt} = \frac{P_{dc}}{u_{Ceq}} - i_{dc} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{sxy} , u_{cxy} 为网侧和换流站侧电压 xy 分量; i_{sxy} 为换流站机端电流 xy 分量; R_{arm} , L_{arm} 为桥臂电阻电抗; u_{dc} 为换流器接入直流节点电压; C_{eq} 为 MMC 等值电容; u_{Ceq} 为 MMC 等值电容电压; P_{dc} 为直流功率; ω_B 为基准角速度; ω_l 为标么角速度。

图 4 中机端电压从 xy 分量 dq 分量的变换可用(6)表示。柔直换流站的控制策略除了常见的电网跟踪型外, 也包含电网构造型^[19]。电网构造型输出电压不跟踪电网频率, 由自身给定, 如图 5 所示。柔直换流站的控制策略与方程可参考文献[20]。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: θ 为 PLL 输出功角; u_{dq} 为电压在 dq 轴下分量; u_{xy} 为电压在 xy 轴下分量。

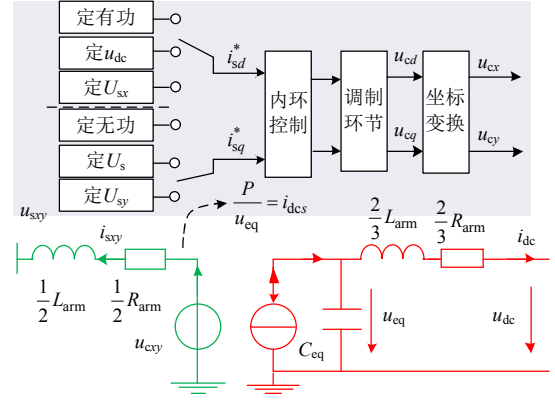


图 4 换流器方程与控制策略

Fig. 4 Function and control strategy of MMC

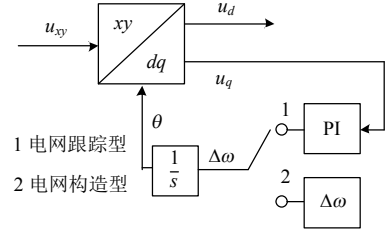


图 5 坐标变换结构: 锁相环与给定频率

Fig. 5 Transformer of axis: the phase locked loop and given frequency

2.4 双馈风机建模

为方便大规模风电场仿真, 本文双馈风机采用忽略了定子暂态的三阶模型^[21]。由于风机的异步电机部分的气隙均匀, 可任意选取坐标轴方向。本文选取统一 xy 坐标系。此时, 其定转子方程可写为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{sx} \\ e_{sy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & -X_l \\ X_l & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix} \\ \frac{de_{sx}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \left[e_{sx} + \frac{L_m^2}{L_r} i_{sy} \right] + s e_{sy} - \frac{L_m}{L_r} u_{rx} \\ \frac{de_{sy}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \left[e_{sy} - \frac{L_m^2}{L_r} i_{sx} \right] - s e_{sx} + \frac{L_m}{L_r} u_{ry} \\ e_{sx} = -\frac{L_m}{L_r} \varphi_{ry}, e_{sy} = \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rx}, X_l = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_{sxy} 为风机机端电压, u_{rxy} 为转子电压; φ_{rxy} 为转子磁链; i_{sxy} 为风机定子电流; L_m 为定转子间互感; L_s , L_r 为定转子互感; R_s , R_r 为定转子电阻; s 为转差。

风机模型中网侧变流器公式为式(8), 机网侧变流器之间的直流电容 C_w 采用式(9)计算。

$$\begin{cases} \frac{L_g}{\omega_B} \frac{di_{cx}}{dt} = u_{sx} - u_{cx} - R_g i_{cx} + \omega_l L_g i_{cy} \\ \frac{L_g}{\omega_B} \frac{di_{cy}}{dt} = u_{sy} - u_{cy} - R_g i_{cy} - \omega_l L_g i_{cx} \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{C_w}{\omega_B} \frac{du_{Cw}}{dt} = \frac{P_{rsc}}{u_{Cw}} - \frac{P_{gsc}}{u_{Cw}} \quad (9)$$

式中: L_g 和 R_g 为连接电抗电感与电阻; P_{rsc} 为机侧变流器功率; P_{gsc} 为网侧变流器功率; u_{cw} 为电容电压; i_{cxy} 为网侧变流器机端电流。工具箱中双馈风机模型其他方程与控制策略参照文献[22]。使用者可根据需要修改模型, 采用其他方程或控制策略。本工具箱提供的双馈风机模型中网侧变流器采用定直流电压控制, 机侧变流器则采用 MPPT 控制。由于双馈风机的控制方程处于 dq 坐标系中, 控制方程得到 dq 坐标系下的转子电压 u_{tdq} 后, 需经式(6)转换至 xy 坐标系下的 u_{txy} 。

2.5 两种交流接口的处理

工具箱采用直接解法求解网络方程^[23]。该方法的实质是将网络复数线性代数方程式(4)的实虚部分开, 增阶化为 xy 同步坐标下的实数线性代数方程, 并与注入电流节点的方程联立求解。计算时, I_E 和 Y_E 两者对应元素相互关联, 并表现出两种接口方式: 机端电流接口和虚拟电流接口。若模型交流侧方程中的暂态过程不可忽略, 则存在机端电流对时间的导数项, 应采用机端电流接口。若模型交流侧方程中的暂态过程可被忽略, 应采用虚拟电流接口。下面举例说明两种接口的处理方式。

机端电流接口以柔直换流站为例, 此时式(4)中 I_E 设备接入节点处的元素为式(5)换流站机端电流 i_{scy} 。无需修改 Y_E 中设备接入节点处的自导纳。如图6所示, 此时参与网络方程计算的为机端电流。

双馈风机中异步电机和网侧变流器与网络直接连接, 需考虑接口问题。因此, 虚拟电流接口以风机异步电机部分为例。整理式(7)中异步电机的定子电压方程可得:

$$\begin{bmatrix} i_{\text{sx}} \\ i_{\text{sy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_{\text{sx}} \\ I'_{\text{sy}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\text{sx}} \\ u_{\text{sy}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中虚拟电流 I'_{scy} 和等值导纳 Y_{GB} 表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} I'_{\text{sx}} \\ I'_{\text{sy}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x & b_x \\ b_y & g_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\text{sx}} \\ e_{\text{sy}} \end{bmatrix}, & Y_{\text{GB}} = \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \\ g_x = g_y = G_x = G_y = \frac{R_s}{R_s^2 + X_1^2} \\ b_x = -b_y = B_x = -B_y = \frac{X_1}{R_s^2 + X_1^2} \end{cases} \quad (11)$$

如图6所示。参与计算的 I_E 中的元素为虚拟电流 I'_{scy} , 并需要在 Y_E 对应元素处加入等值导纳 Y_{GB} 。

进一步考虑风机网侧变流器与网络的接口。类似柔直换流站, 网侧变流器采用机端电流接口。由于网络方程为线性方程, 满足叠加原理。可利用式(8)

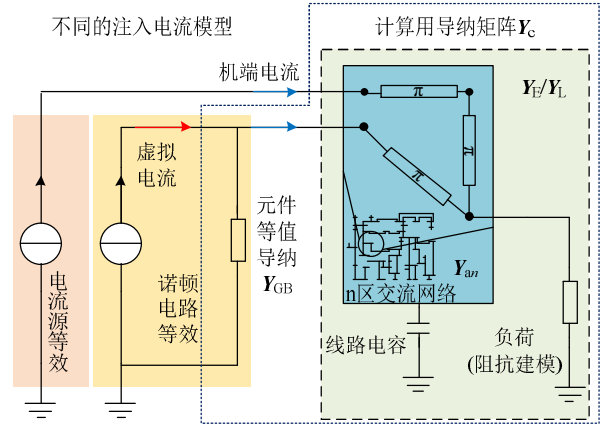


图6 设备模型与交流网络的接口

Fig. 6 Interface between equipment model and AC grid

计算出网侧变流器机端电流 I_{cxy} , 并与异步电机虚拟电流 I'_{scy} 相加, 得双馈风机综合电流 I_{gxy} , 成为 I_E 的组成元素。而采用机端电流接口的网侧变流器等值导纳为 0, 因此双馈风机整体等值导纳与其异步电机部分相同。

由于存在如同步电机每一时步等值导纳 Y_{GB} 会发生变化的设备, 因此需在每一时步更新 Y_{GB} , 加入 Y_E 设备接入节点处的自导纳中, 得到最终计算用矩阵 Y_c 。

总体来看, 交流网络中设备模型与各导纳矩阵 Y_{an} , Y_L/Y_E 和 Y_c 的关系如图6所示。 Y_{an} 为用于潮流计算网络导纳矩阵。将阻抗建模的负荷并入 Y_{an} 后得 Y_L , 线性变换后得 Y_E 。进行暂态仿真时, 时刻更新等值导纳 Y_{GB} , 加入 Y_E 后得到计算用导纳矩阵 Y_c , 最终用于计算模型端电压的方程(12), 其中的 I_E 包括元件的虚拟电流或机端电流。

$$U_E = Y_c^{-1} I_E \quad (12)$$

2.6 直流电网建模

直流线路由考虑暂态过程的 π 型电路等效。由此, 一个由 n 个节点和 b 条线路构成的直流网络可由节点联系矩阵 T_{dc} , 线路电阻矢量 R_{br} , 电感矢量 L_{br} , 电容矢量 C_{br} 定义。其动态方程由 n 个节点程和 b 个线路方程构成, 直流网络的节点电压可以由直流节点电压矢量 u_{dc} 描述, 线路电流可以由直流线路电流矢量 i_{br} 描述。以一个直流网络(如图7所示)为例。可以看到, 节点联系矩阵是一个 $n \times b$ 维的矩阵, 当其中元素为 1 时, 表示该线路的正方向为流出节点, -1 表示线路正方向流入节点, 0 表示线路与节点无直接联系。注意节点 i 的电容 $C_{\text{bus}i}$ 由连接到 i 节点的线路集合 I 的线路电容相加得到。

对节点 i 来说, 可列出节点电压方程:

$$|T_{\text{dc}}(i,:)| C_{\text{br}} \frac{du_{\text{dc}i}}{dt} = i_{\text{dc}i} - T_{\text{dc}}(i,:) i_{\text{br}} \quad (13)$$

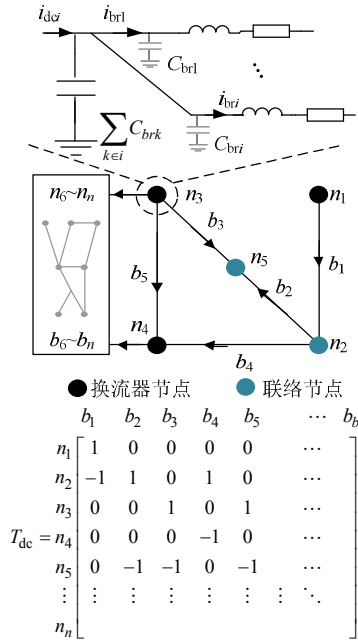


图7 直流电网的结构图

Fig. 7 Structure of DC grid

式中： u_{dci} 为 i 节点直流电压；对换流器节点， i_{dci} 等于式(5)中的 i_{dc} ，对于联络节点， i_{dci} 为 0。

同样，对于线路 b 来说，可以列出方程：

$$L_{br}(b) \frac{di_{brb}}{dt} = T_{dc}(:,b)u_{dc} - R_{br}(b)i_{brb} \quad (14)$$

为方便建模，将式(13)和(14)对所有节点和线路的方程以矩阵形式写出。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ x = \begin{bmatrix} u_{dc} \\ i_{br} \end{bmatrix}, u = i_{dc} \\ A = \begin{bmatrix} 0 & -C_{ndg}^{-1}T_{dc} \\ L_{bdg}^{-1}T_{dc}^T & L_{bdg}^{-1}R_{bdg} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} C_{ndg}^{-1} \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $L_{bdg} = \text{diag}(L_{br})$, $R_{bdg} = \text{diag}(R_{br})$, $C_{ndg} = \text{diag}(|T_{dc}| C_{br})$

2.7 交直流常见故障的处理

交流线路切除可以通过在网络导纳矩阵中线路对应互导纳和对应自导纳处减去线路导纳量实现。对于交流三相短路故障，故障节点电势为 0。为实现这一点，在工具箱中，可以将短路节点自导纳修改成一个足够大的值，以使节点电压实际为零。对于非对称短路，可以通过添加附加阻抗的方式来模拟非对称短路的情况。

设备切除可通过切除连接设备的线路来实现。但由于设备内存在含参考值的控制系统。在切除线路后，控制系统可导致部分状态变量发散或随机波动，浪费计算资源，甚至影响仿真结果。因此，工具箱中实现设备切除的方法是使模型输出电流与

等值导纳为 0。同时，使模块内所有积分环节停止积分，通过该方法防止状态变量发散。为实现该目标，可在使能子系统内设置部分积分环节，在切除时刻对使能端置零，停止子系统运行，或使用开关模块在切除时刻后对积分模块的输入输出置 0。

为模拟直流线路切除情况，可将被切除线路对应电阻设置成一个足够大的值，如 10^6pu ，即可近似实现线路切除的效果。可预先设置好式(15)中切除直流线路后的 A 阵，在切除时刻切换 A 阵。

2.8 数值求解算法

工具箱可以直接利用 Simulink 中的数值求解器，克服了大多数开源工具箱求解算法少的缺点。目前 Simulink 中包含 ode1, ode2, ode3, ode4, ode5, ode8, ode14x, ode1be 这 8 种定步长求解器和 ode45, ode23, ode113, ode15s, ode23t, ode23t, ode23tb, odeN 这 8 种变步长求解器。使用者可根据仿真需要，直接在 Simulink 设置页面中选择合适的数值求解算法，并对求解步长和容差等进行设置，无需对模型进行修改。

3 工具箱实例建模

目前，工具箱中已建立常见的标准测试系统，包括基于 IEEE 39 节点、68 节点，及 WECC179 节点标准系统的交直流混联模型。本节以图 8 所示系统为例，展示在本文所提工具箱中建立模型的过程。包括模型的文件结构、初始化步骤、如何添加模型。系统包括 2 个陆上电网，2 个风电场以及一个五端直流网络系统。风电场区域包含 5 台等值双馈风机模型。每个模型表征 30 台相同风速的 1.5MW 的风机聚合。陆上同步电机没有考虑二次调频。直流系统采用主从控制，VSC2 为定直流电压站。VSC1 和 VSC2 分别从节点 2 和节点 9 接入 IEEE 39 节点系统。VSC3 从节点 46 接入 WECC9 节点

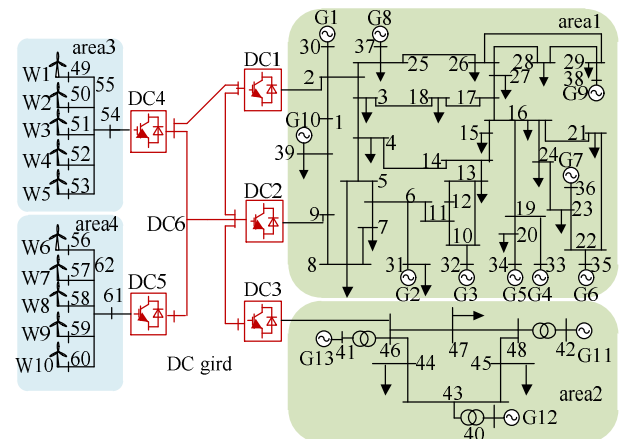


图8 带风电场的交直流混联系统

Fig. 8 AC/DC hybrid grid with wind farm system

系统。图中 U_{xy} 为机端电压在 xy 轴上的分量, I_{xy} 为模块注入电流在 xy 轴上的分量。

在建立图 8 系统时: 1) 在 MATACDC 或其他潮流计算软件中输入对应的潮流数据。2) 将所需模块从工具箱的模型库中拖出, 放置在 Simulink 文件中, 按照图 9 和图 10 的方式连接。3) 加入对应设备模型的初始化 m 文件, 并在其中输入对应参数。选取一个风电机组(图 10)进行说明。双馈风机模块内的参数和初始值由初始化 m 文件给定。输入量为风速 V_w 、机端电压在 xy 坐标下分量 U_{xy} 和切除信号 $trip$, $trip$ 为 1 时切除该元件。输出是综合电

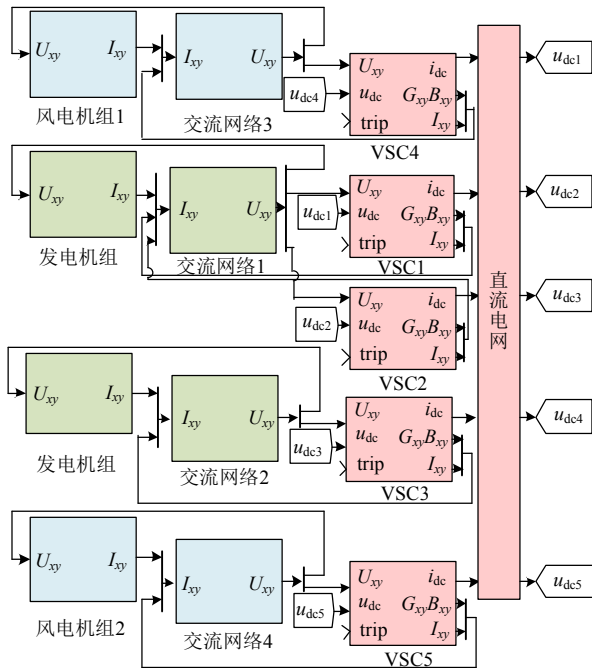


图 9 工具箱内模型界面

Fig. 9 Model interface in toolbox

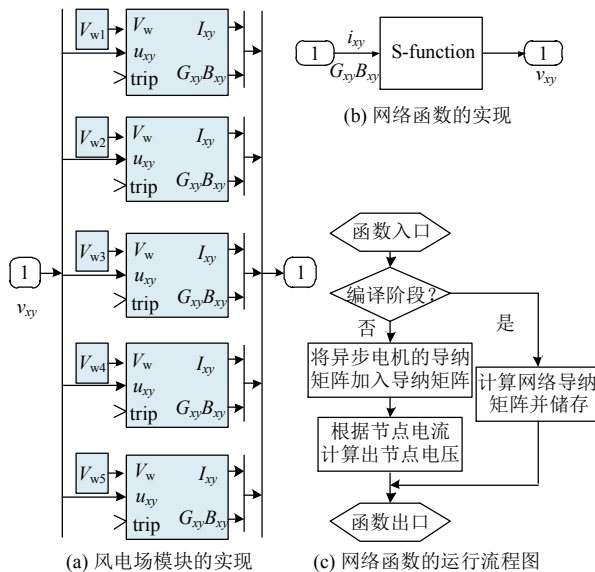


图 10 风电场在 Simulink 中的实现

Fig. 10 Model of wind farm in Simulink

流 I_{gy} 和等值导纳 G_x, G_y, B_x, B_y 。这些量被综合后输入风电场区域交流网络子系统中。

交流导纳矩阵按式(2)分解成多个导纳矩阵 $Y_{a1} \sim Y_{an}$, 并储存至各区对应的 S-function 中, 构成网络函数, 网络函数内部的计算流程如图 10(c)所示。在计算的每一步, 网络函数根据是否故障来修改网络导纳矩阵, 合并模型等值导纳, 并利用式(12)计算设备机端电压在 xy 坐标系下的分量, 作为设备模型的输入。

直流网络则是通过利用 S-function 编程实现式(15)。直流网络模块的输入量为注入各直流节点的直流电流, 输出量为各直流节点的直流电压。

本文选取柔直流换流站展现添加自定义模块过程。添加自定义模块需以下 3 步: 1) 构建柔直流换流站的相关潮流数据。2) 组织方程(5)以及图 4 和图 5 所示控制策略, 利用 Simulink 模块搭建如图 11 所示的结构。其中, 微分方程可以利用积分模块构建, 而多种控制策略可利用使能子系统和开关模块集成。柔直流换流站采用机端电流接口, 等值导纳 G_x, G_y, B_x, B_y 设置为 0, 输出电流为机端电流。将柔直流换流站模块的输入输出与网络模块相连, 实现与网络的连接。3) 在 MATLAB 中编写柔直流换流站的初始化程序, 利用潮流计算结果, 编程计算出模型中状态变量的初始值。

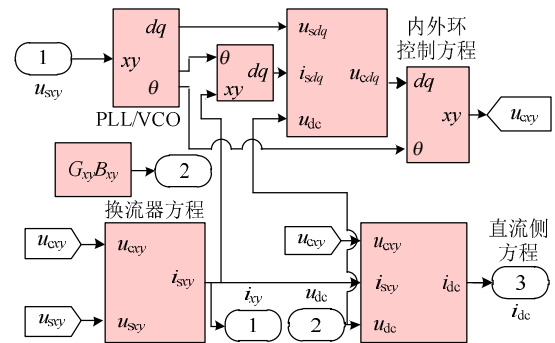


图 11 Simulink 中的柔直流换流站模块

Fig. 11 Module of converter in Simulink

在确保网络参数, 设备参数与设备初始值均已正确输入后。运行初始化 m 文件, 将系统参数和状态变量初始值赋值给对应模型。选择合适的 Simulink 算法进行计算。系统输出可根据需要设定, 利用 Simulink 内 scope 等模块可查看动态曲线。

4 仿真分析

4.1 与电磁暂态仿真的对比验证

为验证模型正确性, 分别在本工具箱和 Simscape 中构建如图 12 系统的动态模型和电磁暂

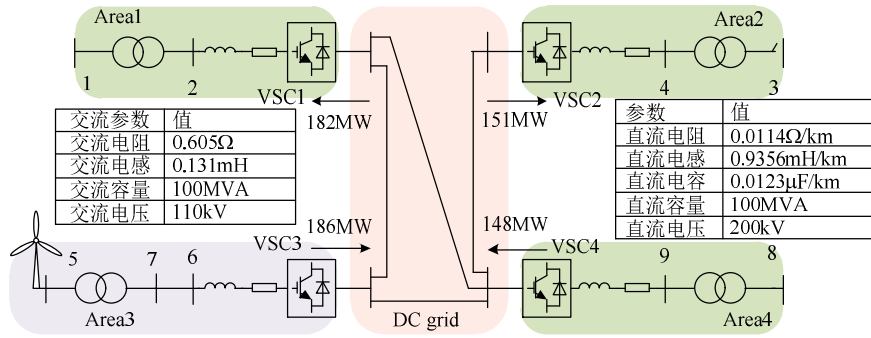


图 12 测试系统单线图

Fig. 12 Single-line diagram of the testing system

态模型。其中,风机模型为 200 台单台容量 1.67MW 风机的等值。VSC1 为定直流电压节点, VSC2 和 VSC4 采用定功率控制。VSC3 为定交流电压控制。控制参数详见附录 A。所建动态模型采用变步长求解器 ode23tb 进行求解以节省仿真时间。

4.1.1 工况 1: 风速变化

为验证整体系统动态的正确性,对比 2 个模型在风机风速变化时系统动态。结果如图 13 所示,初始时,风速为 15m/s,风机工作于恒转速区,转速 1.2pu,输出功率 200MW。5s 时,风速下降 7.5m/s。风机逐渐过渡至最大功率跟踪工作区,风机转速下降,输出功率下降。风速刚开始下降时,由于风机工作于恒转速区,功率下降较快,各节点直流电压有较大下降,随后由于定直流电压控制作用,直流

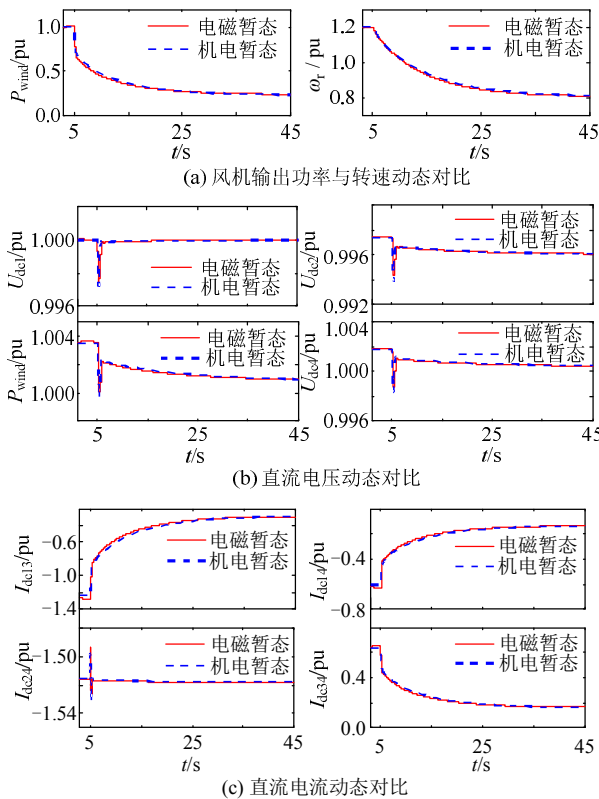


图 13 风速变化时电磁暂态和动态模型仿真对比

Fig. 13 Simulation comparison of electromagnetic transient model and dynamic model when wind speed change

电压恢复。接着,各节点电压和线路电流因风机功率下降而缓慢下降。可见利用 Simscape 中电磁暂态元件搭建的模型与在本模型箱中构建的模型仿真结果基本一致。

4.1.2 工况 2: 直流故障

为验证直流动态的正确性,对比 2 个模型在直流故障时系统动态。风机工作状态与工况 1 初始相同,在 1.5s 时,直流线路 14 被切除,并在 2.5s 时重新投入,在 4s 时, VSC4 被切除。在图 14 中列出直流系统各参数动态。

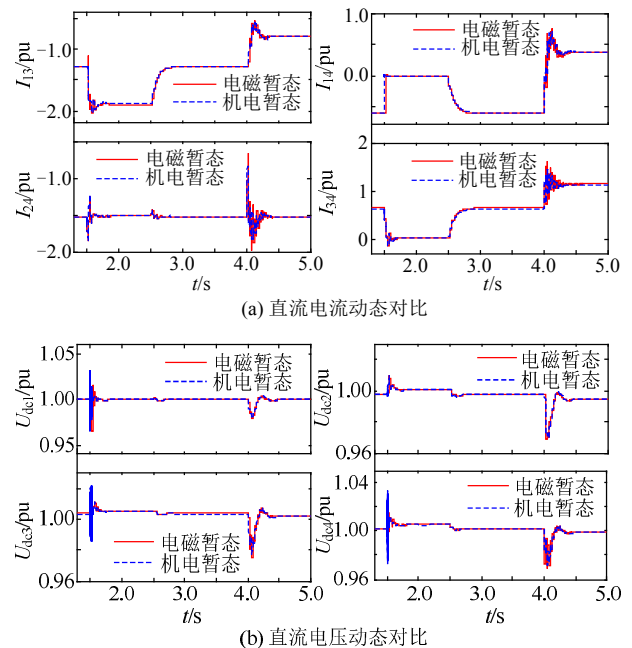


图 14 直流故障时电磁暂态和动态模型仿真对比

Fig. 14 Simulation comparison of electromagnetic transient model and dynamic model when DC system fault

在 1.5s 时,线路 14 被切除,因此通过线路 14 的电流变至 0,风机输入功率被转移至线路 13,使其电流上升。在 2.5s 时,线路重新投入,系统恢复至故障前的工作状态。

4s 时,换流器 4 被切除,由于大量的有功缺失,整体直流电压下降,后因 VSC1 定直流电压控制恢复。由于从 4 节点注入直流的功率变为 0,因此恢

复稳态后的4节点电压比正常工况略微下降。

除去少量高频分量外,电磁暂态模型与本工具箱中的动态模型的仿真结果相同。并且分析结果与仿真曲线变化情况一一对应。

4.2 典型算例暂态仿真分析

为进一步展现工具箱中模型的动态特性,利用图8所示的典型新一代电力系统进行仿真测试。

4.2.1 算例1: 风速变化与VSC功率变化

在2s时,区域3风电场中的W1—W5风机处风速随机上升0.8~1.2m/s,5s时,区域4风电场中W6—W10处风速随机下降1.5~1.9m/s,20s时,VSC3向区域2中注入功率增加30MW。

从图15中看出模型较准确地表现了风电场中各风机的动态。区域3风电场输出功率从180MW上升至240MW左右,区域4风电场输出功率从180MW下降至110MW左右。

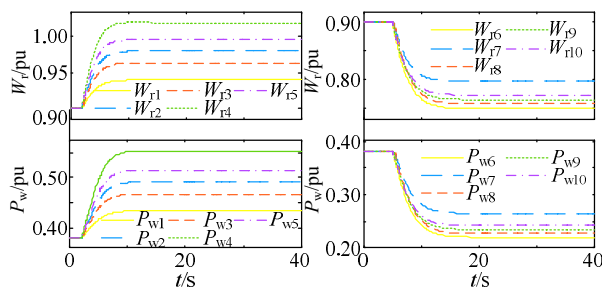


图15 风速变化时风电场的动态过程

Fig. 15 Dynamic process of wind farm when wind speed change

图16反映了直流系统动态过程。随着风机输出功率的变化,VSC4和VSC5的注入功率及其对应的节点直流电压同时变化。VSC2为维持直流电压稳定,2~5s从直流电网吸收更多功率,5s后吸收更少功率;而随着VSC3从直流电网吸收更多功率,VSC2则吸收更少的功率以维持直流电压平衡。

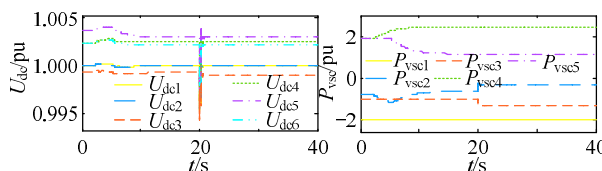


图16 风速变化时柔直系统动态过程

Fig. 16 Dynamic process of DC grid when wind speed change

图17展现了陆上电网动态过程。随着注入陆上电网的功率变化,陆上电网的频率和同步电机出力变化:区域1电网2s时由于注入功率的增多,频率逐渐上升,随后,由于电场出力下降和区域2吸收更多功率,系统的频率逐渐下降。由于VSC3采用定功率控制,因此风速变化不影响区域2频率。20s后,由于注入区域2的功率增多,系统频率上升。可以看出,模型完整的展现了风电场、直流系

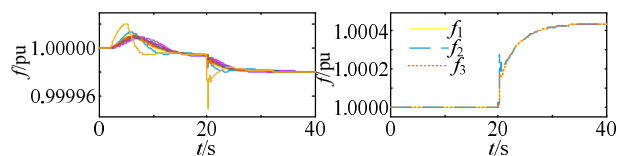


图17 风速变化时电网动态过程

Fig. 17 Dynamic process of power grid when wind speed change

统和陆上电网的动态过程。

4.2.2 算例2: 换流器退出

在5s时,VSC1退出运行。如图18所示,由于短时间内直流电网的功率无法送出,直流电压快速升高,后随着定直流电压控制恢复。

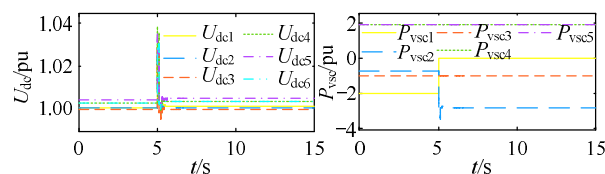


图18 换流器退出时直流系统动态

Fig. 18 Dynamic process of DC grid when VSC outage

如图19所示,区域1受直接影响,各电机的转速受功率分配影响有不同变化。而区域2由于采用定有功控制,未受到影响。该结果与文献[24]小信号分析的结论一致。

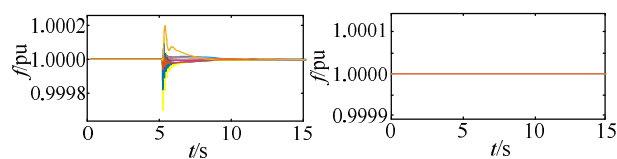


图19 换流器退出时电网动态过程

Fig. 19 Dynamic process of power grid when VSC outage

4.3 小干扰分析

在MATLAB已有的电力系统分析工具箱中,部分需要手工推导系统A阵元素,额外编程对系统进行线性化分析,或在自定义模型时满足工具箱中线性化求解器的要求并与之交互。这使线性化模型困难。而在本工具箱中,则可利用Simulink中的线性化工具箱快速得到系统的小信号模型。首先,在Simulink界面中根据需要选取线性化点。接着,在Simulink中启动线性化工具箱进行线性化,即可得到系统的小信号模型。本算例对风电场区域进行线性化分析,观察参数变化时极点运动情况。

改变VSC4轴外环比例系数 $K_{pvsc4}=2.8\sim4$,观察极点的移动如图20。可以看到,当外环比例系数等于3.2时,存在振荡频率26.73Hz的主导失稳模态。

为验证上述结论的正确性,2s时,在模型中设置一个阶跃,使比例系数从4减小为3.2。仿真结果如图21所示,当参数从4减小为3.2时,风电场区域出现频率为26.73Hz的振荡失稳,验证小信号

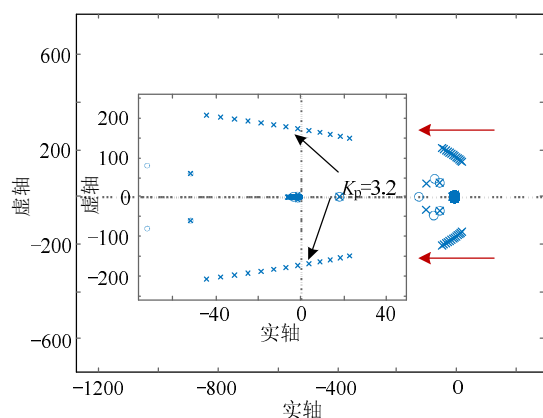


图 20 参数变化时的极点变化趋势

Fig. 20 Variation trend of poles when parameters change

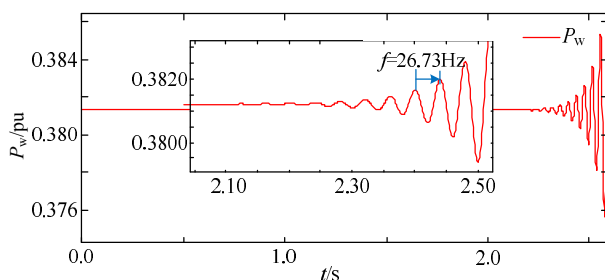


图 21 参数阶跃后风机功率仿真结果

Fig. 21 Dynamic of power of DFIG when controller parameter step

分析的准确性。

5 结论

针对传统 MATLAB 开源工具箱使用门槛高, 自定义建模困难, 不够灵活, 难以适用于新一代电力系统动态仿真和研究的问题, 本文开发一种基于 MATLAB/Simulink 的新一代电力系统动态仿真工具箱。本文在详细阐述了工具箱中交流网络分块建模, 风电、柔直建模, 其与交流网络的接口和常见故障的设置等基本原理的基础上, 以一个对带风电场交直流混联系统建模实例来展现工具箱的建模特点。在仿真部分, 对比风电经四端直流并网电磁和本工具箱中模型的仿真结果, 对带风电场交直流混联系统进行时域、小干扰和振荡分析, 结论如下:

1) 工具箱具有可移植、模块化、开放式的优点。工具箱内模型尽可能由 Simulink 模块构成, 减少编程内容, 无封装内容, 使其易于学习修改。模型分块构成, 可实现模型分块测试, 提高建模效率。

2) 工具箱内可建立任意结构的多交流多直流带新能源的混合系统, 能够准确的反映系统内不同部分不同元件的动态过程, 非常适用于新一代电力系统的动态仿真。

3) 工具箱充分利用了 MATLAB 已有的工具箱和求解器, 减少了重复编程工具的内容, 使研究人

员可以更专注于电力系统本身的问题, 可以方便的利用工具箱进行小干扰稳定分析和先进控制策略验证。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904. Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [2] 杨仁忻, 施刚, 蔡旭, 等. 风电-多端柔直送出系统电压源型控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1498-1509. Yang Renxin, Shi Gang, Cai Xu, et al. Voltage source control of VSC-MTDC systems with wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1498-1509(in Chinese).
- [3] Xiong Y, Yao W, Wen J, et al. Two-level combined control scheme of VSC-MTDC integrated offshore wind farms for onshore system frequency support[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems: 1-12[2020-05-29]. doi: 10.1109/TPWRS. 2020. 2998579.
- [4] Wang W, Jiang L, Cao Y, et al. A parameter alternating VSG controller of VSC-MTDC systems for low frequency oscillation damping[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems: 1-13[2020-05-26]. doi: 10.1109/TPWRS. 2020. 2997859
- [5] 沈郁, 陈伟彪, 姚伟, 等. 采用新型自适应动态规划算法的柔性直流输电附加阻尼控制[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3768-3774. Shen Yu, Chen Weibiao, Yao Wei, et al. Supplementary damping control of VSC-HVDC transmission system using a novel heuristic dynamic programming[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3768-3774(in Chinese).
- [6] Wu Z, Zhou X. Power system analysis software package (PSASP): an integrated power system analysis tool[C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 1998: 7-11.
- [7] 江全元, 彭旭东, 张宝星. PSS/E: 一种先进的电力系统分析仿真软件[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 60-62. Jiang Quanyuan, Peng Xudong, Zhang Baoxing. PSS/E: an advanced software package for power system analysis and simulation[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 60-62(in Chinese).
- [8] 张东辉, 金小明, 周保荣, 等. PSS/E 的自定义建模及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 82-87. Zhang Donghui, Jin Xiaoming, Zhou Baorong, et al. User-defined modeling in PSS/E and its applicability in simulations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 82-87(in Chinese).
- [9] 翟江, 夏天, 田芳, 等. PSASP 用户自定义建模混合步长仿真机制的实现与应用[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3497-3502. Zhai Jiang, Xia Tian, Tian Fang, et al. Realization and application of mixed step simulation mechanism of user defined modeling in PSASP[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3497-3502(in Chinese).
- [10] 孟新军, 徐得超, 李亚楼. PSASP 用户自定义建模优化算法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 214-218. Meng Xinjun, Xu Dechao, Li Yalou. Research on optimization algorithm for user-defined modeling of power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 214-218(in Chinese).

- [11] Chow J H, Cheung K W. A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 1992, 7(4): 1559-1564.
- [12] Milano F. An open source power system analysis toolbox[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2005, 20(3): 1199-1206.
- [13] Cole S, Belmans R. MatDyn, a new Matlab-based toolbox for power system dynamic simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2011, 26(3): 1129-1136.
- [14] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Thomas R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2011, 26(1): 12-19.
- [15] Schoder K, Hasanovic A, Feliachi A, et al. PAT: a power analysis toolbox for MATLAB/simulink[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2003, 18(1): 42-47.
- [16] Ugalde-Loo C E, Adeuyi O D, Wang S, et al. Open access simulation toolbox for the grid connection of offshore wind farms using multi-terminal HVDC networks[C]//13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017). Manchester, UK: IET, 2017: 1-6.
- [17] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 基于 Matlab/Simulink 的电力系统仿真工具箱的开发[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 95-101.
- Yao Wei, Wen Jinyu, Cheng Shijie, et al. Development of a Matlab/Simulink based power system simulation toolbox[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 95-101(in Chinese).
- [18] Beerten J, Belmans R. Development of an open source power flow software for high voltage direct current grids and hybrid AC/DC systems: MATA CDC[J]. IET Generation, Transmission & Distribution. 2015, 9(10): 966-974.
- [19] Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2012, 27(11): 4734-4749.
- [20] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [21] Ekanayake J B, Holdsworth L, Jenkins N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines[J]. Electric Power Systems Research. 2003, 67(3): 207-215.
- [22] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [23] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [24] Du W, Fu Q, Wang H. Small-signal stability of an AC/MTDC power system as affected by open-loop modal coupling between the VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2018, 33(3): 3143-3152.



林思齐

在线出版日期: 2020-10-19。

收稿日期: 2020-06-29。

作者简介:

林思齐(1997), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流混联电网稳定与控制, 柔性直流输电系统及其控制等, E-mail: lin_sq047@hust.edu.cn;

熊永新(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为交直流混联电网稳定与控制, 柔性直流输电系统及其控制等, E-mail: yongxin_xiong@foxmail.com;

姚伟(1983), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等, E-mail: w.yao@hust.edu.cn;

艾小猛(1986), 男, 博士, 研究方向为鲁棒优化理论在电力系统中的应用, 可再生能源特性分析与并网优化运行等, E-mail: xiaomengai1986@foxmail.com;

文劲宇(1970), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大电网大机组安全稳定控制、储能与新能源并网、直流输电等, E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn。

(实习编辑 李健一)

附录 A

表 A1 验证系统控制参数
Tab. A1 Control parameters of test system

符号	控制参数	值
K_{pPrw}	风机机侧 d 轴外环比例系数	0.5
K_{iPrw}	风机机侧 d 轴外环积分系数	1.2
K_{pIrw}	风机机侧电流内环比例系数	0.95
K_{iIrw}	风机机侧电流内环积分系数	1
K_{pPgW}	风机网侧 d 轴外环比例系数	1
K_{iPgW}	风机网侧 d 轴外环积分系数	20
K_{pIgW}	风机网侧电流内环比例系数	2
K_{iIgW}	风机网侧电流内环积分系数	5
K_{pU3}	风电场侧换流站(3 号站)d 轴外环比例系数	2
K_{iU3}	风电场侧换流站(3 号站)d 轴外环积分系数	20
K_{pQ3}	风电场侧换流站(3 号站)q 轴外环比例系数	2
K_{iQ3}	风电场侧换流站(3 号站)q 轴外环积分系数	20
K_{pI3}	风电场侧换流站(3 号站)电流内环比例系数	2
K_{iI3}	风电场侧换流站(3 号站)电流内环积分系数	60
$K_{p2,4}$	从换流站(2,4 号站)有功外环比例系数	5.06
$K_{i2,4}$	从换流站(2,4 号站)有功外环积分系数	382.7
$K_{pL2,4}$	从换流站(2,4 号站)电流内环比例系数	0.04
$K_{iL2,4}$	从换流站(2,4 号站)电流内环积分系数	0.28
K_{pUdc1}	主换流站(1 号站)直流电压外环比例系数	45
K_{iUdc1}	主换流站(1 号站)直流电压外环积分系数	950
K_{pI1}	主换流站(1 号站)电流内环比例系数	1
K_{iI1}	主换流站(1 号站)电流内环积分系数	1
K_{pQ}	1,2,4 号站无功外环比例系数	4.06
K_{iQ}	1,2,4 号站无功外环积分系数	261.7

表 A2 设备模型参数
Tab. A2 Parameters of devices in model

符号	器件参数	值
C_{eq}	换流站直流电容 μF	150
L_m	风机电机互感 pu	2.67
L_s	风机定子自感 pu	2.719
L_r	风机转子自感 pu	2.735
R_s	风机定子电阻 pu	0
R_r	风机转子电阻 pu	0
H_{rw}	风机惯量系数 s	10.05