

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200307

# 模型-数据混合驱动的直驱风机 VSC 等效建模方法

陈剑<sup>1</sup>, 王海风<sup>1,2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学) 北京 102206; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 建立电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)模型对研究风机并网特性具有重要作用。为了解决目前 VSC 线性化模型对高频电力电子开关器件建模繁琐以及数据驱动模型泛化性差、精度低等问题, 提出了一种基于模型与数据混合驱动的 VSC 等效建模方法。将 VSC 模型中的比例积分控制环节采用线性化模型进行快速计算, 以及脉宽调制环节采用时间卷积网络构建数据模型。同时, 将信号分解合成嵌入到数据模型的学习过程中, 构建模型数据混合驱动下的 VSC 深度学习建模框架。算例通过 PSCAD 仿真数据, 给出了永磁直驱同步风机 VSC 模型的建立过程。采用不同工况下的样本验证了所提方法的可行性与优越性。

**关键词:** 直驱风机; VSC; 混合驱动; 时间卷积网络; 深度学习; 等效建模

## A model-data hybrid driven method of VSC equivalent modeling of a permanent magnetic synchronous generator

CHEN Jian<sup>1</sup>, WANG Haifeng<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electric Power Systems with New Energy Resources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Establishing a Voltage Source Converter (VSC) model plays an important role in the study of wind turbine grid-connected characteristics analysis. In order to solve the problem that the VSC linearization model is cumbersome for modeling high-frequency power electronic switching devices, and the fact that the data-driven model has poor generalization and low precision, this paper proposes a VSC equivalent modeling method based on a model-data hybrid drive method. In the VSC model, fast calculation of a proportional-integral control link is done using a linearization model, and then the data model of the PWM link is constructed using a time convolutional network. At the same time, the signal decomposition synthesis is embedded into the learning process of the data model, and the VSC deep learning modeling framework driven by the model-data hybrid is constructed. The establishment process of a VSC model of a permanent magnet direct driven synchronous generator is given by PSCAD simulation data. The feasibility and superiority of the proposed method are verified by samples under different working conditions.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. YJ201654).

**Key words:** permanent magnet synchronous generator (PMSG); voltage source converter (VSC); hybrid driven; time convolution network (TCN); deep learning; equivalent modeling

## 0 引言

近年来,随着新能源电力电子器件的广泛接入,基于电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)和脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术的永磁直驱同步发电机以其灵活快速的控制能力得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。同时,风电接入对电力系统的影响也

日益显著,系统振荡稳定事件频有发生<sup>[4-7]</sup>,但风电场中风机数量庞大,其动态特性与规律不明是目前稳定性分析与控制的难点,因此,风机的动态建模对于研究其动态特性具有重要意义。

为了研究风机的动态特性,国内外学者在 VSC 建模方面做出了重要贡献,其研究主要分为三类: 1) 线性化建模方法<sup>[8-11]</sup>,建立 VSC 的线性化模型容易进行数值计算以及特征值分析。如文献[11]结合小信号分析法建立 VSC 全局小信号模型,并采用特

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助(YJ201654)

征值分析研究了次同步振荡稳定的影响因素。然而, 线性化建模方法由于忽略了电力电子器件中的高频开关状态, 使得线性化模型与实际模型动态特性差距较大。2) 仿真实验方法<sup>[12-16]</sup>, 该方法更关注模型的动态输出特性或整体特性, 如文献[15]基于 RTDS 建立了永磁直驱风机直流并网的仿真模型, 基于此研究了风电系统启动和停机过程。文献[16]针对交直流系统电磁-机电暂态仿真提出了多尺度混合仿真的模型并模拟了风电经 VSC-HVDC 并网多尺度暂态现象如风功率波动期间发生的不对称故障。但仿真实验的方法需要精细建模, 随着系统中风机数量的不断增多以及参数获取困难, 使得基于参数化的建模方法越来越无法适应工程实际的应用。3) 数据驱动建模方法<sup>[17-21]</sup>, 广域相量测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)的发展<sup>[19]</sup>为电力系统安全稳定分析提供了多维海量数据, 近几年以深度神经网络为基础的数据驱动方法在电力领域的非线性系统建模中广泛应用。如文献[20]提出综合实测数据与主要内部机理的 VSC 有功模型建模方法, 但有功模型采用分段阶跃函数表示, 拟合效果不佳。文献[21]采用长短期记忆网络实现了微电网数据驱动建模。数据驱动模型虽然建模过程简单, 但其存在物理意义难以解释的固有缺陷, 因此不被广泛应用。

目前风电接入对电力系统的振荡稳定影响日益显著, 传统的风电并网稳定性分析多以建立数学模型并通过求解包含全网模型的高阶非线性微分代数方程组进行全时域仿真, 但随着风电规模的不断扩大, 存在风机参数未知、控制方式不清以及计算精度与计算效率不能兼顾等实际问题, 同时, 也面临着电网模型阶数急剧增长的“高维”问题。因此, 本文综合考虑直驱风机线性化理论模型的优势以及数据模型的易学习扩展的特性, 提出了基于模型数据混合驱动的等效建模思路, 构建了模型数据双驱动的直驱风机 VSC 模型机器学习的理论框架。与全数据驱动建模方法不同的是, 本文将直驱风机换流器模型比例积分控制(Proportional Integral, PI)环节用线性化模型进行快速计算, 而 PWM 环节采用数据模型, 最终 VSC 模型由两个环节共同驱动生成。本文算例通过 PSCAD 仿真数据, 给出了直驱风机 VSC 模型的建立过程, 验证了所提方法的可行性。

### 1 直驱风机的 VSC 模型

直驱式永磁同步风力发电机的主要部件包括: 风轮、永磁同步发电机、电压源型换流器及其控制系统等。其中 VSC 由机侧换流器(Machine Side

Converter, MSC)、直流电容以及网侧换流器(Grid Side Converter, GSC)三部分构成, 其电气结构如图 1 所示<sup>[22-23]</sup>。

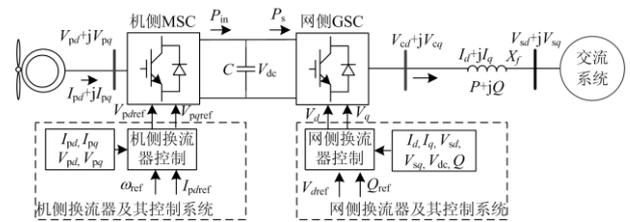


图 1 直驱风机电气结构

Fig. 1 Electrical structure of direct-driven wind generator

直驱风机并网的系统中通过直流电容将直驱风机的 MSC 与 GSC 隔断, 则研究交流电网侧的响应时可将机侧 MSC 与网侧 GSC 独立分析, 电磁振荡模式与风机 GSC 的相关性强, 而与风机永磁同步机、机侧换流器等其他部分关系较弱, 且直流电压可测量, 因此直驱风机 VSC 并网的动态特性可由 GSC 的动态特性表示, 其控制系统如图 2 所示。在进行线性化理论建模时常常忽略 PWM 部分, 而实际信号中由于开关器件引入的信号突变, 对分析风机的动态特性存在较大影响, 为了建立更精细的等效模型, 本文补充了 GSC 模型中 PWM 的调制环节。

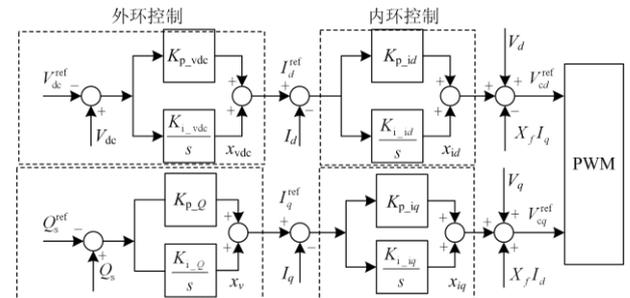


图 2 直驱风机网侧换流器控制图

Fig. 2 Control structure of GSC

PWM 的调制环节具体过程如图 3 所示: 由 PI 控制的输出信号(\$dq\$ 轴的参考电压相量)\$[V\_{cd}^{ref}; V\_{cq}^{ref}]\$,

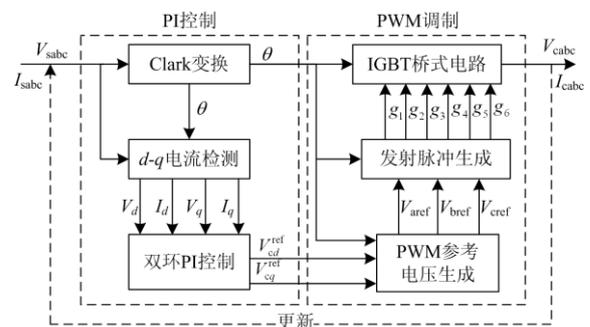


图 3 风机换流器 PWM 的调制过程

Fig. 3 PWM modulation process of converter

又作为 PWM 调制过程的输入。PWM 调制时首先经过 PWM 参考电压生成模块得到三相交流参考信号  $[V_{s\text{ref}}; V_{sb\text{ref}}; V_{sc\text{ref}}]$ ；然后将生成的参考电压输入发射脉冲生成模块，得 IGBT 的控制信号  $g_1, g_2, \dots, g_6$ ；进而由控制信号控制 IGBT 桥式电路模块得到输出，即经过 PWM 输出为锯齿形三相电压信号，最后经滤波更新网侧三相交流信号  $[V_{ca}; V_{cb}; V_{cc}]$ 。

## 2 VSC 模型数据混合驱动基本原理

### 2.1 VSC 混合驱动数学模型

VSC 混合驱动模型是在深度学习算法框架下考虑线性化机理模型的数据模型，通过建立各电气量之间的数据映射关系，实现由当前时刻电气量预测出下一时刻输出的动态建模。要建立 VSC 等效模型，首先要通过简化控制环节以明确数据变量输入输出关系，从而获取数据算法建立所需要的样本。由图 1 可知，其数据变量大致可分为进入 PI 控制环节的数据与进入 PWM 调制环节数据两部分，并且其均存在参考跟踪问题，因此，本文为了更真实地描述直驱风机的内在特征及外部响应特性，提出 PI 环节采用理论模型引导，PWM 环节采用数据驱动的混合建模方法。其中 PI 控制环节能够直接线性化表示为

$$\begin{cases} PI_{d\text{out}} = \left( K_{p\text{-}id} + \frac{K_{i\text{-}id}}{s} \right) (I_d^{\text{ref}} - I_d) \\ PI_{q\text{out}} = \left( K_{p\text{-}iq} + \frac{K_{i\text{-}iq}}{s} \right) (I_q^{\text{ref}} - I_q) \\ I_d^{\text{ref}} = \left( K_{p\text{-}vdc} + \frac{K_{i\text{-}vdc}}{s} \right) (V_{dc}^{\text{ref}} - V_{dc}) \\ I_q^{\text{ref}} = \left( K_{p\text{-}v} + \frac{K_{i\text{-}v}}{s} \right) (Q^{\text{ref}} - Q) \end{cases} \quad (1)$$

由图 2 可知，PWM 模型的输入为 PI 控制环节的输出与交流侧反馈信号的加法运算得到的参考电压，如式(2)所示。

$$\begin{cases} V_{cd}^{\text{ref}} = V_d + PI_{d\text{out}} - X_f I_q \\ V_{cq}^{\text{ref}} = V_q + PI_{q\text{out}} - X_f I_d \end{cases} \quad (2)$$

PWM 的作用是脉宽调制，输出信号是调制后输出的  $V_{cd}$ 、 $V_{cq}$ 。设 PWM 的模型为  $FPWM(\cdot)$ ，则调制后输出的并网电压表示为

$$\begin{cases} V_{cd} = F_{\text{PWM1}}(V_{cd}^{\text{ref}}, V_{cq}^{\text{ref}}) \\ V_{cq} = F_{\text{PWM2}}(V_{cd}^{\text{ref}}, V_{cq}^{\text{ref}}) \end{cases} \quad (3)$$

将进入 PWM 的参考电压信号作为输入量，将

调制后输出的电压作为输出量，则 PWM 的模型为  $FPWM(\cdot)$ ，可通过机器学习得到。

综合式(1)一式(3)，可得 VSC 并网后的电流对电压的响应，即混合驱动数学模型，表示为

$$X_f \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \omega_0 \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \omega_0 \begin{pmatrix} V_{cd}^{\text{ref}} - V_d \\ V_{cq}^{\text{ref}} - V_q \end{pmatrix} \quad (4)$$

因此，通过对上述过程分析，明确整个 VSC 模型的输入为控制算法中设定的电压、无功环节参考值；由前一环节输入的直流电压  $V_{dc}$  以及经过 PWM 调制并滤波后输出到交流系统中的三相交流电压电流  $[V_{dc\text{-ref}}; Q^{\text{ref}}; V_{dc}; V_{sabc}; I_{sabc}]$ ，输出为交流电网的三相电压与三相电流  $[V_{sabc}; I_{sabc}]$ 。通过对输入输出变量进行深度学习便能够建立 VSC 的动态等效模型。

### 2.2 基于 TCN 网络的 PWM 环节数据建模

在 VSC 混合驱动模型中，PWM 部分需要根据当前时刻 PI 环节的输出以及交流侧反馈的信号作为输入序列来预测 PWM 的输出序列特性，即利用机器学习算法拟合映射  $FPWM(\cdot)$  进而得到预测值。

深度卷积网络具有良好的特征提取能力，使得卷积网络在图像识别方面应用广泛，而近期有研究针对时间序列问题，提出了时间卷积网络 (Temporal Convolutional Network, TCN) 架构模型<sup>[24]</sup>，并发现 TCN 在音频合成、文本建模、机器翻译等多方面都比长短记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM) 网络有更好的表现。相比于传统的卷积神经网络或 LSTM 网络，TCN 网络主要有两大特点：1) 扩张卷积；2) 残差连接，因此其深度小但记忆距离长，通过扩张卷积的参数调整，能使其在深度合适的情况下具有很长的记忆范围。本文选择 TCN 网络建立 PWM 数据模型能够充分体现其时间序列的特性。由式(2)可知输入数据经过 PI 环节后，变量数目缩减，这会影响到数据建模的精度，因此，将信号分解的思想加入到 PWM 数据建模中。对 PWM 输入信号的每一维变量分解为交流成分、直流成分、噪声扰动三个信号，人为预先划分特征。信号分解采用小波分析<sup>[25]</sup>先提取噪声信号  $D_{x\epsilon}$ ，再提取直流成分  $D_{xD}$ ，最后提取交流成分  $D_{xA}$  的步骤进行。

最终经过信号分解环节后，进入 PWM 学习器的原始输入数据记为  $D_{x1} = \{D_{x\epsilon}, D_{xD}, D_{xA}\}$ ，输出数据理论值分解记为  $D_{\text{out}} = \{D_{o\epsilon}, D_{oD}, D_{oA}\}$ 。基于 TCN 的 PWM 数据建模是建立输入分解数据与输出分解数据的非线性关系：

$$\hat{D}_{\text{out}} = \text{TCN}(D_{x1}) \quad (5)$$

训练数据通过特征提取及拟合获得式(5)的关

系函数得到 PWM 的预训练模型。

### 2.3 VSC 混合驱动建模具体流程

以量测的 VSC 接入交流电网的运行数据为基础, 应用模型数据混合驱动建模思想, 对 VSC 等效建模的步骤如图 4 所示。

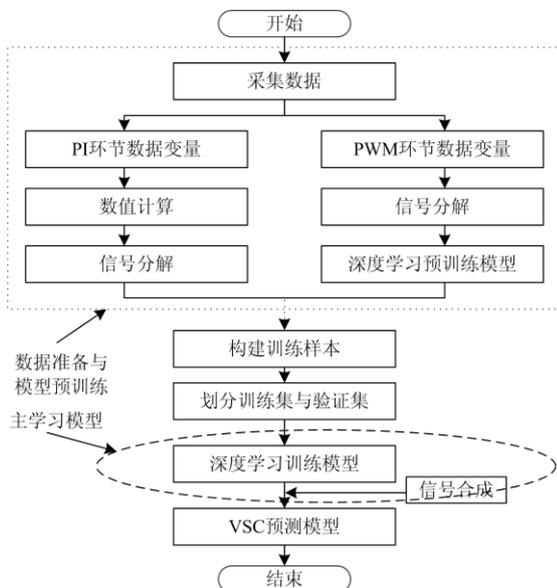


图 4 VSC 混合驱动建模框架

Fig. 4 Framework of VSC hybrid driven modeling

## 3 仿真系统设计与数据获取

### 3.1 仿真系统设计

为验证本文建模方法的准确性, 本文在 PSCAD 仿真平台上搭建了如图 1 所示的单机 VSC 并网系统, VSC 及发电机的仿真参数见表 1。

表 1 仿真实验参数

Table 1 Simulation and experimental parameters

参数	数值
VSC 容量/MW	2.6
网侧滤波电阻 $R/\Omega$	$1 \times 10^{-3}$
网侧滤波电感 $L/mH$	$335 \times 10^{-3}$
直流电容 $C/\mu F$	15 000
直流母线电压 $U_{dc}/V$	1 450
逆变器控制	
参数	
$K_{p\_Vdc}$	7
$K_{i\_Vdc}$	800
$K_{p\_I}$	0.3
$K_{i\_I}$	20
发电机其他	
参数	
$D$	15
$X_d$	1
$X_q$	1
$X'_d$	0.5
$T'_{d0}$	0.1

### 3.2 数据说明和获取

#### 1) 数据说明

本文在构造学习模型时, 整个 VSC 模型的输入为  $[V_{dc-ref}; Q_{ref}; V_{dc}; V_{sabc}; I_{sabc}]$ , 输出分别是 PI 控制环节的输出电压参考值  $[V_{abc-ref}]$ 、VSC 输出端采集的  $[V_{cabc}]$  以及最终模型整体输出  $[V_{sabc}, I_{sabc}]$ 。将各个输入电气量作为输入, 实现由当前时刻电气量预测出下一时刻 VSC 输出的动态建模, 电气量符号说明与图 1—图 3 一致, 表 2 为混合驱动模型需要记录的时间序列说明。

表 2 模型的输入输出量

Table 2 Input and output of model

输入节点	相应输入量
1	当前时刻 VSC 的输出电压 $U_{sabc}$
2	当前时刻 VSC 的输出电流 $I_{sabc}$
3	当前时刻 VSC 的电压相角 $\theta$
4	前一环节的输出直流电压 $V_{dc}$
5	电容电压参考值 $V_{dc-ref}$
6	VSC 无功功率的参考值 $Q_{ref}$
输出节点	相应输出量
PI 环节输出	下一时刻 VSC 的输出电压参考值 $U_{abc-ref}$
PWM 环节输出	下一时刻 VSC 的输出电压 $U_{abc}$
模型最终输出	下一时刻交流电网电压 $U_{sabc}$ 以及电流 $I_{sabc}$

#### 2) 仿真系统数据获取

为了获得更加丰富的样本, 采用不同的工况数据模拟其动态特征。采用不同的工况数据模拟其动态特征。设置仿真的采样频率为 1 000 kHz, 在 VSC 稳定后开始记录数据, 截取仿真时长为 1 s。设置在不同的出力下的稳态运行与暂态仿真, 并且对于暂态仿真, 0.3 s 时在交流电网侧设置不同的故障类型 (单相接地、两相短路、两相短路接地、三相短路), 考虑所有故障持续时间 100 ms, 随后切除, 故障状态下系统仍运行在安全稳定域内, 即故障电流与故障电压均在采取限制措施时的运行极限内。按照表 2 中数据变量记录输入输出数据, 同时, 对记录样本标记其故障类型与故障位置, 其中故障位置线路前端中末端分别用 {A, B, C} 标注, 故障类型用 {0, 1, 2, ...} 标注。

对所有获取的电气量进行标幺化及去均值处理, 形成样本数据集  $D$ 。经过上述过程共产生 1 000 组有效样本数据。

## 4 训练过程与测试分析

### 4.1 混合驱动模型训练过程

按照 2.3 节中流程, 先利用训练样本学习 PWM 数据模型, 进而对数据模型以及 PI 环节进行深度学

习, 得到 VSC 学习模型, 训练与测试的均方误差值随迭代次数增加的曲线示意图如图 5 所示。表 3 给出了迭代过程中均方误差值及训练用时。由训练结果可以看出在训练 200 次时, 模型测试均方误差降为 20% 以下, 已经基本能够用来表征 VSC 模型动态特性。

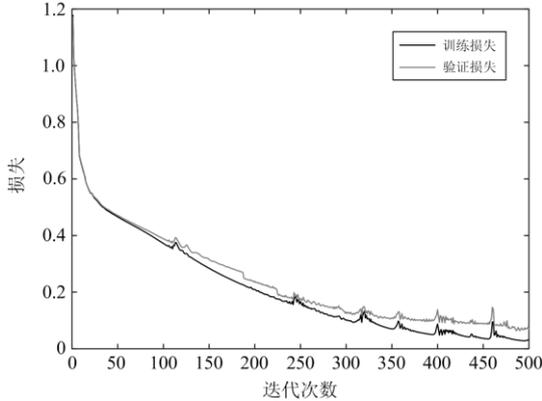


图 5 均方误差随迭代次数增加的曲线  
Fig. 5 Curve of MSE with iterations

表 3 不同训练次数下的均方误差及训练用时

Table 3 MSE and training times in different training epoch

训练次数	训练误差/%	验证误差/%	用时/s
20	56.53	57.24	120.52
50	46.62	47.18	189.33
100	37.21	38.25	545.67
200	18.71	19.67	1 292.25
500	3.75	6.76	3 376.50

#### 4.2 暂态过程仿真测试

在系统正常运行过程中, 假设逆变侧交流系统突然在 0.3 s 时发生单相接地故障, 故障持续时间为 100 ms, 采用本文提出的混合驱动模型测试该故障下 VSC 在电网不对称条件下的暂态特性。

系统中 VSC 的 PI 环节更关注机电暂态过程, 而 PWM 模拟高频电子开关器件更关注电磁暂态过程, 因此为了测试混合驱动模型对暂态过程的适应性, 分别采用不同的步长进行仿真验证, 其中, 机电暂态过程的仿真步长为  $t=10\text{ ms}$ , 仿真时长为 0~1 s; 电磁暂态过程的仿真步长为  $t=10\text{ }\mu\text{s}$ , 仿真时长为 0.3~0.32 s。图 6 给出了采用混合驱动模型仿真与实际仿真的 A 相电压的对比曲线。

系统中 VSC 的 PI 环节更关注机电暂态过程, 而 PWM 模拟高频电子开关器件更关注电磁暂态过程, 因此为了测试混合驱动模型对暂态过程的适应性, 分别采用不同的步长进行仿真验证。

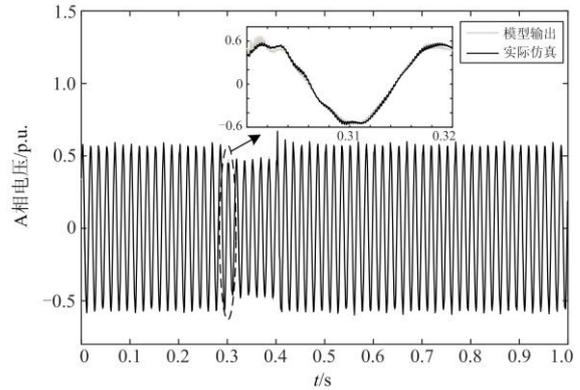
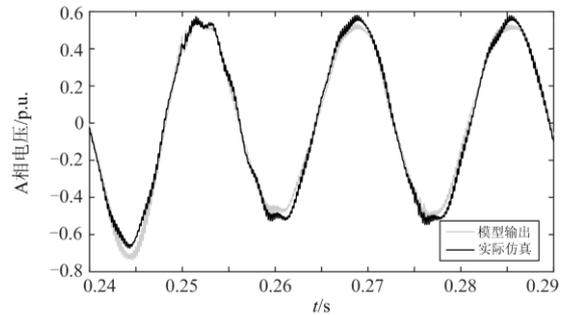


图 6 暂态过程仿真测试曲线

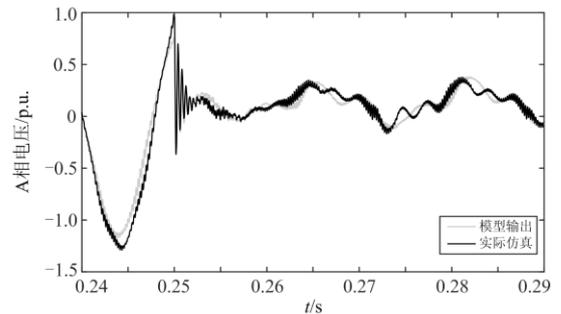
Fig. 6 Simulation test curve of transient process

#### 4.3 模型泛化性测试

为了验证混合驱动模型的泛化性, 本文通过在任取不同于训练样本的新运行点进行暂态仿真形成验证数据样本, 模拟实际系统的量测数据, 暂态仿真时在 0.25 s 分别设置单相接地、两相短路、三相短路故障类型得到三组不同的测试样本, 故障持续时间为 100 ms。模型采用 500 次迭代训练产生的模型。为了充分显示电磁暂态过程的区别, 仿真步长为  $t=10\text{ }\mu\text{s}$ , 仿真长度为 0.24~0.29 s, 图 7 给出三组测试样本的 A 相电压波形与混合驱动模型输出 A 相电压波形。从测试曲线可以看出, 混合驱动模型的输出与实际仿真曲线的波形能够很好地近似。



(a) A相接地故障



(b) AB两相相间短路故障

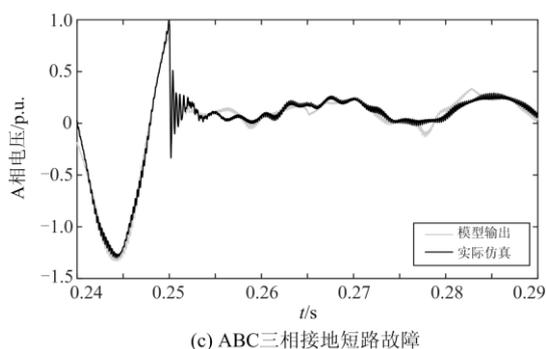


图 7 不同运行工况下的测试曲线

Fig. 7 Test curve under different operating conditions

#### 4.4 不同数据驱动网络效果对比

为验证本文所提方法以及 TCN 网络的优越性, 本文分别采用 BP 网络、RBF 网络和 LSTM 网络替换数据模型部分, 采用 4.1 中样本分别对三种网络重新训练模型, 测试采用 4.3 中三组测试数据样本。表 4 给出了不同网络结构的训练测试误差, 其中不同网络的训练迭代次数均为 500 次。

表 4 不同网络数据模型的误差比较

Table 4 Error comparison of different network in data models

样本集	网络误差	网络结构			
		BP	RBF	LSTM	TCN
原始样本	训练误差/%	34.05	29.26	6.052	2.75
样本 1	测试误差/%	38.39	36.13	14.22	9.06
样本 2	测试误差/%	38.65	37.87	12.33	9.32
样本 3	测试误差/%	37.99	38.56	13.88	9.47

从误差结果可以看出, 相比于 BP 网络、RBF 网络、LSTM 网络, 采用 TCN 网络进行数据建模具有更高的精度, 验证了 TCN 网络对时间序列建模的优越性。

#### 4.5 噪声测试

模型仿真数据没有考虑测量误差的影响, 在实际系统中测量误差通过反馈环节影响控制系统, 为了模拟实际系统的量测, 本文在 3 组验证样本数据中统一增加 10 dB、20 dB、40 dB 的高斯白噪声进行测试, 给出测试结果如表 5 所示。

表 5 样本含噪声测试

Table 5 Results of noise test

噪声	测试均方误差/%		
	样本 1	样本 2	样本 3
不含噪声	9.07	9.32	9.47
10 dB	9.22	9.35	9.28
20 dB	9.66	8.85	9.44
40 dB	10.02	9.39	9.83

与不含噪声的测试结果相比, 结果基本不受影响, 这是由于: 1) TCN 网络结构本身具有降噪功能; 2) 对于时序序列的样本数据集, 增加的噪声对样本整体的特征影响不大, 可能在故障期间具有明显影响。因此, 本文针对样本 1 给出了故障期间的误差曲线, 如图 8 所示。从误差曲线可知, 噪声对模型的影响在可接受范围。

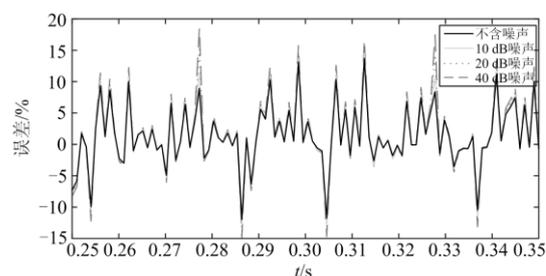


图 8 故障期间的系统误差

Fig. 8 Systematic errors during faults

## 5 结论

本文针对永磁直驱同步发电机的电压源型换流器, 依据线性化建模及数据驱动建模思想, 提出一种基于模型数据混合驱动的 VSC 等效建模方法, 主要结论如下。

1) 从模型整体来看: 混合驱动模型能够更好地表征 VSC 的外特性, 同时, 能够充分考虑模型内部特征而适应含反馈环节的参数跟踪系统。

2) 从数据模型来看: 相比于几种常用的神经网络, 在混合驱动模型中采用 TCN 网络结构, 在处理动态时间序列方面, 具有更快的特征提取能力及更高的精度。同时, 将信号分解的方法嵌入到数据驱动学习中, 能够提高机器学习对数据形态的依赖性, 从问题本身出发提高了网络特征提取能力。

3) 从测试结果来看: 采用模型数据混合驱动的方法具有较高的精度, 且模型受噪声影响不大, 具有良好的泛化性能。

综上, 本文采用模型数据混合驱动的方法实现了 VSC 的等效建模, 根据其输入输出特性, 建立 VSC 的数据模型; 建模时无需精确获知所有风机 VSC 参数和控制方式, 文章通过对模型的动态特性进行了多场景的对比测试, 该方法与传统的线性化理论建模相比, 更加容易实现。同时, 在实际系统运行过程中, 采用该方法能够根据其实测数据建立数据模型, 并用于分析在不同运行条件和扰动作用下风机的动态特性, 从而有助于分析其并网后的稳定性问题。

## 参考文献

- [1] 王利超, 于永军, 张明远, 等. 直驱风电机组阻抗建模及次同步振荡影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 170-177.  
WANG Lichao, YU Yongjun, ZHANG Mingyuan, et al. Impedance model and analysis of subsynchronous oscillation influence factors for grid-connected full-converter wind turbines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 170-177.
- [2] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multiterminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [3] 王一凡, 赵成勇, 郭春义. 双馈风电场孤岛经模块化多电平换流器直流输电并网系统小信号稳定性分析与振荡抑制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2116-2129.  
WANG Yifan, ZHAO Chenyong, GUO Chunyi. Small signal stability and oscillation suppression method for islanded double fed induction generator-based wind farm integrated by modular multilevel converter based HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2116-2129.
- [4] 张陵, 李君芝, 杨金成, 等. 风电汇集地区次同步振荡控制系统的研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 199-207.  
ZHANG Ling, LI Junzhi, YANG Jincheng, et al. Research on subsynchronous oscillation control system for wind power integration areas[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 199-207.
- [5] 张剑云. 哈密并网风电场次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5447-5460.  
ZHANG Jianyun. Research on the mechanism of subsynchronous oscillations of wind farms in Hami[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5447-5460.
- [6] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 连接弱交流电网的VSC-HVDC失稳机理及判据研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3884-3896.  
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, GAO Benfeng, et al. Instability mechanism and criterion analysis of VSC-HVDC connected to the weak AC power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3884-3896.
- [7] 邓王博, 王海云, 常喜强, 等. 大规模直驱风电场次同步振荡的影响因素分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 218-224.  
DENG Wangbo, WANG Haiyun, CHANG Xiqiang, et al. Analysis of influencing factors of subsynchronous oscillation in large-scale direct-driven wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 218-224.
- [8] 丁平, 安宁, 赵敏, 等. 一种实用的电压源型换流器及直流电网机电暂态建模方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 69-76.  
DING Ping, AN Ning, ZHAO Min, et al. A practical modeling method of VSC-HVDC and DC-grid electromechanical transient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 69-76.
- [9] GRDENI A G, DELIMAR M, BEERTEN J. Assessment of AC network modeling impact on small-signal stability of AC systems with VSC HVDC converters[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 119.
- [10] 杜平, 万玉良, 项颂, 等. VSC变流器与弱电网交互作用的次同步振荡关键参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 44-49.  
DU Ping, WAN Yuliang, XIANG Song, et al. Study on key parameters of subsynchronous oscillation between VSC converter and weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 44-49.
- [11] 张芳, 陈晓凯. VSC-HVDC换流站二阶线性自抗扰控制器参数整定研究[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3744-3755.  
ZHANG Fang, CHEN Xiaokai. Research on parameter tuning of second-order LADRC for VSC-HVDC converter station[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3744-3755.
- [12] 朱谷雨, 王致杰, 邹毅军, 等. 永磁直驱风机的小步长硬件在环仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 111-117.  
ZHU Guyu, WANG Zhijie, ZOU Yijun, et al. Research on HIL simulation of direct-driven permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 111-117.
- [13] 王洁聪, 刘崇茹, 徐东旭, 等. 基于实时数字仿真器的模块化多电平换流器内部故障混合仿真模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3831-3842.  
WANG Jiecong, LIU Chongru, XU Dongxu, et al. Hybrid simulation model of modular multilevel converter internal fault based on real-time digital simulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3831-3842.
- [14] 索之闻, 陈启超, 李晖, 等. 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 125-132.  
SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid

- HVDC transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(17): 125-132.
- [15] 张彦兵, 谢文龙, 王伟, 等. 永磁直驱风机直流并网的启停控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 143-148.  
ZHANG Yanbing, XIE Wenlong, WANG Wei, et al. Start/stop control of permanent magnet direct drive wind turbine on DC grid connection[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 143-148.
- [16] 叶华, 安婷, 裴玮, 等. 含 VSC-HVDC 交直流系统多尺度暂态建模与仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(7): 1897-1909.  
YE Hua, AN Ting, PEI Wei, et al. Multi-scale modeling and simulation of transients for VSC-HVDC and AC systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(7): 1897-1909.
- [17] 蔡昌春, 程述成, 邓志祥, 等. 基于模糊 RBF 神经网络的直流微电网并网等效建模[J]. *电网技术*, 2016, 40(11): 3446-3452.  
CAI Changchun, CHENG Shucheng, DENG Zhixiang, et al. DC Microgrid equivalent modeling based on fuzzy-RBF artificial neural network[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(11): 3446-3452.
- [18] 王成亮, 王宏华, 徐钢. 基于反向传播神经网络的发电机进相能力建模研究[J]. *电网技术*, 2011, 35(11): 136-140.  
WANG Chengliang, WANG Honghua, XU Gang. Modeling of generator leading phase ability based on back propagation neural network[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(11): 136-140.
- [19] CUI Mingjian, WANG Jianhui, TAN Jin, et al. A novel event detection method using PMU data with high precision[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 454-466.
- [20] 赵健, 熊浩清, 陈谦, 等. 特高压直流逆变站功率特性与建模[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(6): 1612-1621.  
ZHAO Jian, XIONG Haoqing, CHEN Qian, et al. Analysis and model of output power characteristics in UHVDC inverter stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(6): 1612-1621.
- [21] CAI Changchun, LIU Haolin, TAO Yuan, et al. Microgrid equivalent modeling based on long short-term memory neural network[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 23120-23133.
- [22] 王国栋, 卢少锋, 张晓佳, 等. 风电场 VSC-HVDC 并网不平衡运行改善控制策略[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(1): 44-50.  
WANG Guodong, LU Shaofeng, ZHANG Xiaojia, et al. An improved control strategy for wind farm with VSC-HVDC under unbalanced voltage[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(1): 44-50.
- [23] DU Wenjuan, CHEN Xiao, WANG Haifeng. Power system electromechanical oscillation modes as affected by dynamic interactions from grid-connected PMSGs for wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(3): 1301-1312.
- [24] BAI S, KOLTER J Z, KOLTUN V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling[EB/OL]. [2018-04-19]. <https://arxiv.org/abs/1803.01271>.
- [25] 彭鹏, 吴晓文, 陈炜, 等. 基于小波分解与谱减法的变压器噪声测量预处理方法[J]. *高压电器*, 2019, 55(11): 177-183.  
PENG Peng, WU Xiaowen, CHEN Wei, et al. Preprocessing method for transformer noise measurement based on wavelet packet decomposition and spectral subtraction algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(11): 177-183.

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-07-09

作者简介:

陈剑(1992—), 女, 博士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用, 电力系统稳定控制; E-mail: sdqzjane316@gmail.com

王海风(1960—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定性理论与控制。E-mail: hfwang60@qq.com

(编辑 葛艳娜)