

# 团 标 准

T/CES

## 火电新能源耦合发电系统设备电磁暂态建 模技术规范

Technology specifications for electromagnetic transient modeling of the  
equipment in thermal-renewable power generation system

(征求意见稿)

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国电工技术学会

发 布



## 目 次

前 言 .....	II
引 言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 总则 .....	3
5 同步发电机组模型 .....	4
6 风力发电机模型 .....	7
7 光伏发电单元模型 .....	11
8 静止无功发生器模型 .....	12
9 负荷模型 .....	14
10 输电线路模型 .....	14
11 变压器模型 .....	15
12 其他常用设备模型 .....	16
附录 A (资料性) 参数收集 .....	17
参 考 文 献 .....	22

## 前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会大电机（专业）工作组归口。

本文件起草单位：中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华北电力试验研究院、内蒙古大唐国际托克托发电有限责任公司、清华大学、中国矿业大学（北京）、中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司、大唐国际发电股份有限公司、华北电力科学研究院有限责任公司、金风科技股份有限公司、华为数字能源技术有限公司、思源清能电气电子有限公司。

本文件主要起草人：郭洪义、王劲松、殷波、任树东、谢小荣、张天保、付俊杰、黄子夜、王乐、曹天植、郭锐、刘闯、姚谦、魏星、邵章平、张超、杨海超、杨玉新、李鹏、许洁翊。

## 引　　言

随着我国新型电力系统的建设,依托既有火电厂建设的火电新能源耦合发电系统已经成为我国电力系统重要的组成部分。但是,不同于常规火电厂发电系统,火电新能源耦合发电系统存在高比例新能源、高比例电力电子的特性,这也导致单纯的关注工频或者相近频率范围上的设备、场站或者系统运行状态,无法全面获悉设备、场站或者电力系统运行的真实情况。同时,例如操作过电压引起的系统过电压问题,宽频谐波引起的系统宽频振荡问题等系统级的分析和计算,这些都需要关注电力系统从数微妙到数秒之间的电磁暂态过程。

目前,基于计算机软件辅助的电磁暂态仿真是分析和计算电力系统电磁暂态过程方法中相对准确、高效且受行业内普遍认可的,且利用计算机软件进行的设备级的电磁暂态建模是电磁暂态仿真计算的基础。但是,在实际工作中,设备级的建模和电磁暂态过程分析会由两个不同单位承担。其中,受限于设备供应厂商的商业和技术保密原因,设备级的建模通常由设备厂商承担,场站级、系统级电磁暂态过程分析通常由电科院、设计院以及高校等机构承担。这就造成设备级、场站级、系统级的三级电磁暂态仿真模型的构建无法实现统一规划和实施。同时,电磁暂态过程分析所关注的问题研究的侧重点不同,会导致设备供应商提供的设备级的模型无法满足相应电磁暂态过程分析的确切需求。上述原因,不仅增加了设备厂商和分析计算机构的工作量;同时会增加设备厂商和分析计算机构沟通工作的成本,影响项目进度;甚至会导致电磁暂态分析计算不准确,影响实际工程的安全稳定性。

为确立火电新能源耦合发电系统设备电磁暂态建模技术规范,明确建模工作中的各项环节、接口设置、参数设定、建模条件等要求,特制定本文件,为今后开展火电新能源耦合发电系统设备电磁暂态建模、电力系统电磁暂态计算提供依据。



# 火电新能源耦合发电系统设备电磁暂态建模技术规范

## 1 范围

本文件规定了火电新能源耦合发电系统内同步发电机、风力发电机、光伏发电单元、静止无功发生器、静态无功补偿器、输电线路、变压器、负荷等的电磁暂态模型的建模技术要求。

本文件适用于火电新能源耦合发电系统内上述设备电磁暂态模型的建模，其他形式发电系统也可参考使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1235 同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则  
GB/T 7409.2 同步电机励磁系统第2部分：电力系统研究用模型  
GB/T 19963 风电场接入电力系统技术规定  
GB/T 19964 光伏发电站接入电力系统技术规定  
GB/T 26399 电力系统安全稳定控制技术导则  
GB/T 31464 电网运行准则  
GB/T 32826 光伏发电系统建模导则  
GB/T 32892 光伏发电系统模型及参数测试规程  
GB 38755 电力系统安全稳定导则  
GB/T 40593 同步发电机调速系统参数实测及建模导则  
DL/T 1234 电力系统安全稳定导则  
DL/T 1167 同步发电机励磁系统建模导则  
DL/T 1235 同步发电机原动机及其调节系统参数实测与建模导则  
DL/T 5600 电力系统次同步谐振/振荡风险评估技术规程  
NB/T 31053 风电机组电气仿真模型验证规程  
NB/T 31066 风电机组电气仿真模型建模导则

## 3 术语和定义

GB/T 1235、GB/T 7409.2、GB/T 32826 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3. 1

#### 电磁暂态模型 *electromagnetic transient model*

电磁暂态模型是电力系统中电磁暂态现象的数学表达式，是电力系统分析和计算的基础，通常关注的时间尺度为微秒级。电磁暂态现象是指系统中发生突变的电磁量，包括瞬时电压、瞬时电流、瞬时电流速变、瞬时电压速变、雷电冲击等。

### 3. 2

**电力系统电磁暂态程序 power system electro-magnetic transient program**

用于电力系统电磁暂态分析的仿真软件,包含通过现场测试证实的用于变压器、传输线、各种电机、二极管、晶闸管和开关、控制器等模型,是电力系统中高压电力网络和电力电子仿真应用的程序。

3. 3

**电磁暂态均值模型 electro-magnetic transient average-value model**

不考虑电力电子变换器的动力学特性以及开关事件,使用较为简单的函数关系表现模型输入与输出关系的一种电磁暂态模型。此种类模型计算量较小,适用于较大型电力系统的计算与分析。

3. 4

**电磁暂态均值开关模型 electro-magnetic transient average-switch model**

考虑部分电力电子变换器的动力学特性,不考虑内部开关事件,使用电容、电感的等效电路以及时间平均的 PWM 信号表现模型的输出响应的一种电磁暂态模型。此类模型计算量大,适用于较大电力系统的子系统的计算与分析。

3. 5

**电磁暂态分段线性模型 electro-magnetic transient piecewise-liner model**

考虑电力电子变换器的动力学特性以及开关事件,使用完整的 PWM 信号以及分段线性方程描述开关的导通和关断状态的一种电磁暂态模型。此类模型计算量较大,适用于设备级模型的特性分析。

3. 6

**并网点 point of interconnection**

设备输出的汇总点。

3. 7

**故障穿越 fault ride through**

当电力系统事故或者扰动引起设备并网点电压或频率变化时,在一定的电压、频率变化范围和时间间隔内,设备能够保证不脱网连续运行。

3. 8

**控制系统 control system**

为控制频率/功率等关键参数,所提供的控制元件和设备。

[来源: GB/T 40593-2021, 3. 2]

3. 9

**轴系 shaft system**

机组的左右旋转部件完全连接组装好形成的转动系统。

3. 10

**轴系多质量块弹簧模型 multi-mass spring model of shafting**

用于模拟大型汽轮发电机组轴系轴端之间的力矩传递关系的电磁暂态模型。

3. 11

**贝杰龙线路模型 bergeron model**

贝杰龙线路模型是一种基于分布式电容和电感参数和集中电阻的行波线路模型,以分布式方式来代表PI段的电容和电感元件。

3.12

**频率相关模态域线路模型 frequency dependent (Mode) Model**

本质上是分布式RLC行波模型,包含了所有参数的频率相关性。该模型使用曲线拟合来复现线路或电缆的频率响应,并使用模态技术来求解线路常数并假定恒定的变换。它仅对于理想换位导线系统或单根导线系统是精确的,不能用于非换位导线或同一走廊内具有多个塔型的场合。

3.13

**频率相关相域线路模型 frequency dependent (Phase) Model**

本质上是分布RLC行波模型,包含了所有参数的频率相关性,该模型使用曲线拟合来复现线路或电缆的频率响应。它表示了内部变换矩阵的频率相关性。使用曲线拟合来复现线路或电缆的频率特性。该模型具有最高数值精度和鲁棒性的模型。

3.14

**阻塞滤波器 blocking filter**

由电感、电容并联谐振回路和相关附属设备组成,在机组轴系的自然扭振频率的工频补频率附近形成很大的阻抗用以阻塞该频率电流流入发电机,避免发生机网复合共振,缓解暂态扭矩放大。阻塞滤波器通常串联在发电机升压变压器高压绕组的中性点侧。

[来源: DL/T 5600—2021, 2.0.11]

**4 总则**

4.1 火电新能源耦合发电系统设备用电磁暂态模型应满足大型电力系统分析计算的需求,应在广泛使用的电力系统电磁暂态分析软件中实现。

4.2 本文件中的仿真模型为电磁暂态模型,应能准确反映所仿真设备的动态外特性,且保证与实际设备的外特性一致。

4.3 建模用电力系统电磁暂态程序,应与系统计算和分析单位用程序保持一致。

4.4 对于含电力电子装置的设备,根据仿真计算和分析需求,可采用电磁暂态均值模型、电磁暂态均值开关模型以及电磁暂态分段线性化模型。

4.5 对于火电新能源耦合发电系统的仿真计算和分析,应采用电磁暂态均值模型,仿真步长宜为100微秒及以下。

4.6 对于火电新能源耦合发电系统的子系统的仿真计算和分析,应采用电磁暂态均值开关模型,仿真步长宜为50微秒及以下。

4.7 对于设备级模型的特性分析,应采用电磁暂态分段线性化模型,仿真步长宜为5微秒及以下。

4.8 含电力电子装置设备模型的主电路搭建应与实际设备的主电路结构和参数保持一致。

4.9 涉及控制单元的模型搭建,应与实际设备的控制单元保持一致,且各项参数保持一致。

- 4.10 部分涉及设备运行方式的模型搭建,应与实际设备运行方式保持一致。
- 4.11 模型中涉及商业机密部分,可进行适当封装处理。
- 4.12 电磁暂态模型,应提供相应设备的数学模型参数、技术数据、程序运算流程和使用说明,应具备能供模型参数测试所需要的接口。
- 4.13 对于建模对象,应提供设备的具体型号、设计参数或实测参数、技术数据。对于原动机轴系、发电机励磁系统等,应提供相应检测报告、试验报告以及调试报告。

## 5 同步发电机组模型

### 5.1 通用要求

同步发电机组模型应采用其详细模型,如图1所示,包括轴系多质量块弹簧模型、发电机模型、励磁机模型、控制系统,其中轴系多质量块弹簧模型应包括轴系机械系统,控制系统应包括励磁控制部分、电力系统稳定器部分。

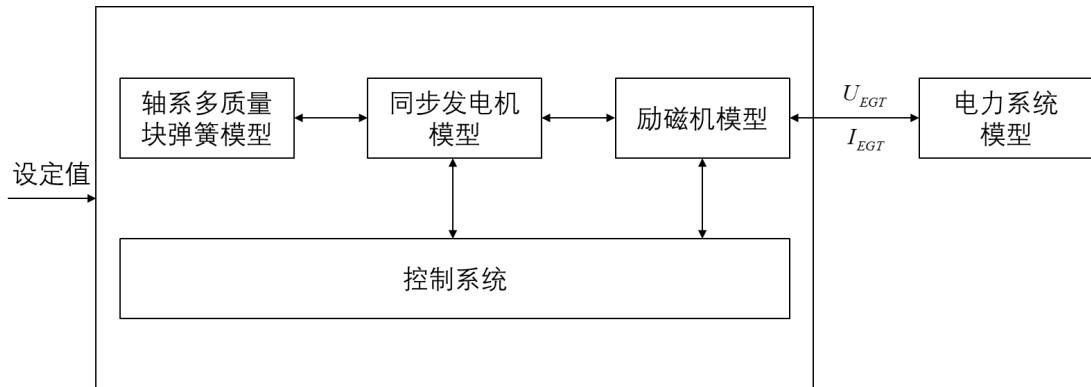


图1 同步发电机组通用模型结构

说明:

$U_{EGT}$  ——同步发电机组机端电压;

$I_{EGT}$  ——同步发电机组机端电流。

### 5.2 模型接口和初始化

#### 5.2.1 模型接口

##### 5.2.1.1 轴系多质量块弹簧模型接口应至少包括以下变量和参数

- a) 输入变量:
  - 1) 机械转矩输入;
  - 2) 电动机电磁转矩输入。
- b) 输出变量:
  - 转速输出,当启用多质量接口时具有一个来自多质量元件的直接转速输入端子。
- c) 可设置的参数:
  - 1) 在模型仿真中需要调整的模型参数,如质量块个数等;
  - 2) 模型额定参数,质量块之间的阻尼等;

3) 模型初始化参数。

#### 5.2.1.2 同步发电机模型接口应至少包括以下变量和参数

- a) 输入变量:
  - 1) 电动机转速;
  - 2) 机械转矩输入;
  - 3) 来自励磁控制器的励磁电压输入。
- b) 输出变量:
  - 1) 定子 3 相电气连接点 (A、B、C 相)，定子为星形连接;
  - 2) 输出至励磁控制器的初始励磁电压;
  - 3) 输出至励磁控制器的励磁电流;
  - 4) 输出至调速器的初始转矩值;
  - 5) 转速输出，当启用多质量接口时具有一个来自多质量元件的直接转速输入端子;
  - 6) 发电机电磁转矩。
- c) 可设置的参数:
  - 1) 在模型仿真中需要调整的模型参数，如同步发电机类型、运行模式等;
  - 2) 模型的额定参数;
  - 3) 模型的初始化参数。

#### 5.2.1.3 励磁机模型及励磁控制部分接口应至少包括以下变量和参数

- a) 输入变量:
  - 1) 初始励磁电压;
  - 2) 机端电压和机端电流有效值;
  - 3) pss 环节输出值;
  - 4) 同步电压参考值。
- b) 输出变量:
  - 励磁电压输出值。
- c) 可设置的参数:
  - 1) 在模型仿真中需要调整的模型参数，如励磁机类型，控制参数等;
  - 2) 模型的额定参数;
  - 3) 模型的初始化参数。

#### 5.2.1.4 电力系统稳定器部分接口应至少包括以下变量和参数

- a) 输入变量:
  - 1) 机端电压;
  - 2) 转速。
- b) 输出变量:
  - pss 环节输出值。
- c) 可设置的参数:
  - 1) 在模型仿真中需要调整的模型参数，如 pss 类型，控制参数等;
  - 2) 模型的额定参数;
  - 3) 模型的初始化参数。

### 5.2.2 模型初始化

初始时同步发电机模型为发电机运行, 达到稳定状态后转电动机模式, 同时启动励磁机模型、励磁控制部分、电力系统稳定器部分、轴系多质量块弹簧模型。

### 5.3 轴系多质量块弹簧模型系统模型

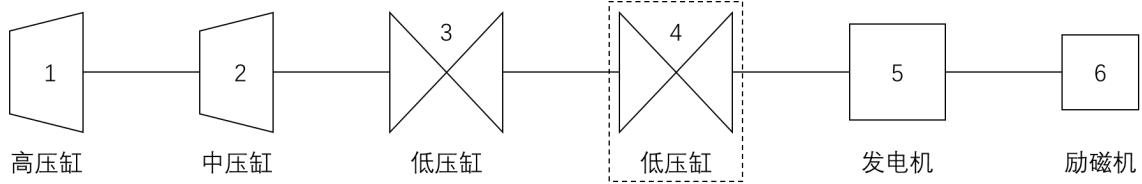


图 2 典型轴系结构示意图

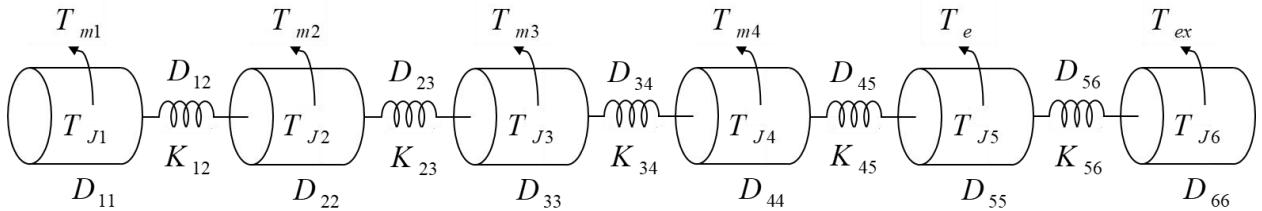


图 3 轴系多质量块弹簧模型

说明:

$D_{ii}$  ——第  $i$  个集中质量块的自阻尼系数;

$D_{i,i+1}$  ——第  $i$  和  $i+1$  个集中质量块之间的互阻尼系数;

$M_i$  ——刚性集中质量块;

$T_{Ji}$  ——第  $i$  个集中质量块的惯性时间常数;

$T_{mi}$  ——作用在汽轮机第  $i$  个质量块上的原动转矩;

$T_e$  ——发电机电磁扭矩;

$T_x$  ——励磁机电磁扭矩;

$k_{i,i+1}$  ——第  $i$  和  $i+1$  个集中质量块之间刚度系数的标幺值。

5.3.1 轴系多质量块弹簧模型应根据实际同步发电机组模型情况搭建, 如图 2 所示, 应包括高压缸、中压缸、低压缸、发电机以及励磁机部分。

5.3.2 轴系多质量块弹簧模型所含参数应如图 3 所示, 具体参数包括等值的  $M_i$ 、 $k_{i,i+1}$ 、 $D_{ii}$ 、 $D_{i,i+1}$ 、 $T_{Ji}$ 、 $T_{mi}$ 、 $T_e$ 、 $T_{ex}$ 。

5.3.3 对于非旋转励磁系统机组因无励磁机所以无  $M_i$  质块。

5.3.4 宽频振荡风险评估用电磁暂态模型应采用简单分段集中质块-弹簧模型。

5.3.5 对于汽轮机、水轮机、燃气轮机都可采用轴系多质量块弹簧模型, 但需要结合厂家提供参数进行现场实测, 并采用实测轴系参数。

### 5.4 同步发电机模型

5.4.1 隐极发电机宜采用六阶实用模型。

5.4.2 凸极发电机宜采用五阶实用模型。

5.4.3 当分析对称运行系统或分析次同步谐振中的扭振互作用和感应发电机效应稳定性时可以不考虑0轴动态。

5.4.4 当考察故障或大扰动引起冲击性扭矩或疲劳时，不应忽略机组0轴方程。

## 5.5 励磁系统及其附加控制系统

5.5.1 励磁系统及其附加控制系统模型建应符合 GB/T 7409.2《同步电机励磁系统第2部分：电力系统研究用模型》和 DL/T 1167《同步发电机励磁系统建模导则》的规定。

5.5.2 当励磁控制系统能通过次同步模式信号，或者需要评估其对次同步谐振的影响，甚至要在励磁控制系统上附加次同步阻尼控制功能时，则应选择电磁暂态分段线性化模型。

5.5.3 当励磁系统对于关注的次同步模式影响很小，如时间常数很大或者采用了抑制次同步模式的带阻滤波器等，可以选择电磁暂态均值模型。

5.5.4 当选择电磁暂态开关均值模型时，需根据现场实测数据，对励磁系统标准模型中的延时环节进行必要的修正补充，获得适用于次同步谐振分析的模型。

## 6 风力发电机模型

### 6.1 通用要求

风力发电机建模应符合的 GB/T 19963《风电场接入电力系统技术规定》规程规定。

6.1.1 风电机组模型应包含风电机组正常运行和故障运行中对并网性能有明显影响的部件，包括机械部件、电气部件、控制、安全及故障保护等模块。

6.1.2 模型应反映过/欠压、过/欠频和过流保护等特性。

### 6.2 风力发电机模型结构

#### 6.2.1 通用结构

6.2.1.1 目前主流风电机组主要分为四类，分别是：

- a) 1型：定速风电机组；
- b) 2型：滑差控制变速风电机组；
- c) 3型：双馈变速风电机组；
- d) 4型：全功率变流风电机组。

6.2.1.2 风电机组通用模型基本结构参见图4所示。对不同类型的风电机组，可根据实际结构对模型进行调整，图中各模块内容依风电机组类型有所不同。

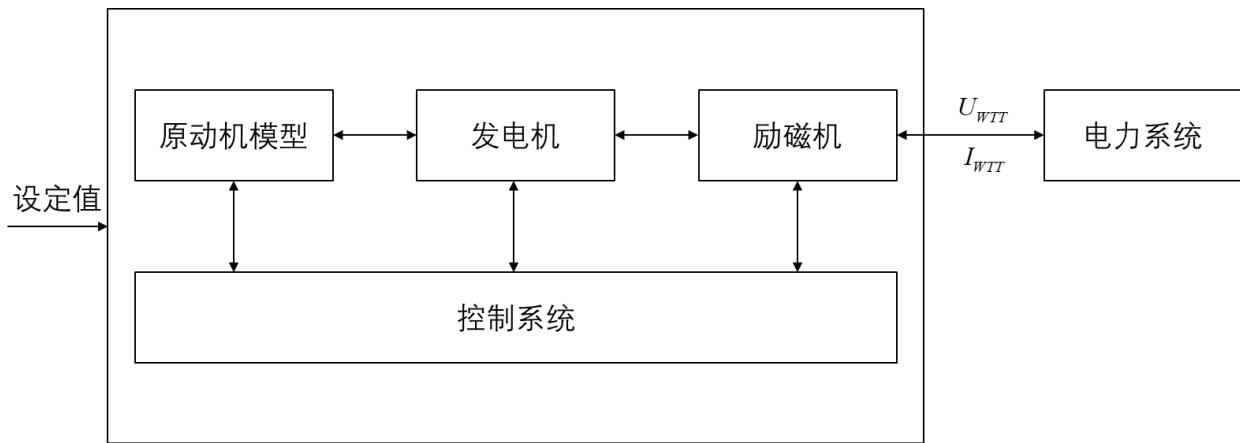


图 4 风电机组通用模型基本结构

说明：

$U_{WTT}$  ——风电机组模型机端电压；

$I_{WTT}$  ——风电机组模型机端电流。

### 6.2.2 1型风电机组

6.2.2.1 发电机变流器系统模块包含发电机模型。

6.2.2.2 控制系统模块可根据风电机组的控制方式及其对并网性能的影响调整或简化。

6.2.2.3 电气设备模块包括并网开关和无功补偿装置。

6.2.2.4 对于通过加装辅助设备实现低电压穿越功能的风电机组，应建立该加装设备仿真模型。

### 6.2.3 2型风电机组

6.2.3.1 发电机变流器系统模块包括发电机模型。

6.2.3.2 控制系统模块应包含滑差控制系统模型。

6.2.3.3 电气设备模块包括并网开关和无功补偿装置。

6.2.3.4 对于通过加装辅助设备实现低电压穿越功能的风电机组，应建立该加装设备仿真模型。

### 6.2.4 3型风电机组

6.2.4.1 发电机变流器系统模块包括发电机和变流器模型。

6.2.4.2 控制系统模块应包含风电机组的主要控制系统模型。

6.2.4.3 电气设备模块包括并网开关。

6.2.4.4 对于通过加装辅助设备实现低电压穿越功能的风电机组，应建立该加装设备仿真模型。

### 6.2.5 4型风电机组

6.2.5.1 发电机变流器系统模块包括发电机和变流器模型。

6.2.5.2 控制系统模块应包含风电机组的主要控制系统模型。

6.2.5.3 电气设备模块包括并网开关。

6.2.5.4 对于通过加装辅助设备实现低电压穿越功能的风电机组，应建立该加装设备仿真模型。

6.2.5.5 对具有低电压穿越保护电路[如直流斩波电路(chopper)]的4型风电机组，机侧变流器、发电机、传动链、空气动力模块和变桨系统可简化，简化模型应能够准确反映发电机、传动链、空气动力模块和变桨系统在低电压系统暂态过程中对变流器运行及并网特性的影响；可采用等效方法简化机侧变

流器, 简化后的模型应能准确反映变流器直流母线及机侧变流器在低电压穿越过程中的暂态电压、电流响应特性。

### 6.3 模型接口

风电机组模型接口应至少包括以下变量和参数:

- a) 输入变量:
  - 1) 风电机组机端电压;
  - 2) 风电机组运行风速, 对于 3 型和 4 型风电机组, 可用有功功率代替风速输入;
  - 3) 风电机组运行无功功率或功率因数指令;
  - 4) 风电机组接受的风电场控制器指令, 如有功功率、无功功率指令等。
- b) 输出变量:
  - 1) 风电机组机端电流;
  - 2) 风电机组有功功率;
  - 3) 风电机组无功功率。
- c) 可设置的参数:
  - 1) 风电机组运行模式, 如电压控制模式、功率因数控制模式、无功功率控制模式等;
  - 2) 在模型仿真中需要调整的模型参数, 如运行模式参数、控制器参数等;
  - 3) 模型额定参数;
  - 4) 模型初始化参数。

### 6.4 子模块模型

风力机空气动力模块可参考 NB/T 31066 《风电机组电气仿真模型建模导则》, 可采用如图 5 所示的模型结构。

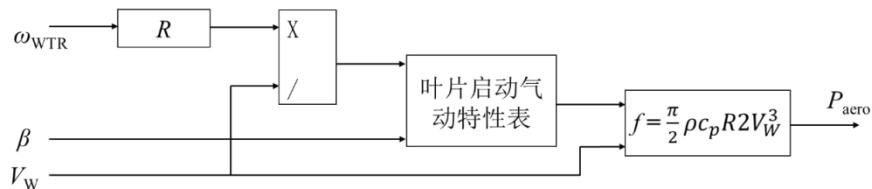


图 5 风力机空气动力模型

说明:

- $B$ ——叶片桨距角, 单位为度 (°);
- $P_{\text{aero}}$ ——风电机组捕获的风功率, 单位为瓦 (W);
- $V_W$ ——风速, 单位为米每秒 (m/s);
- $c_p$ ——风能转换效率系统;
- $\rho$ ——空气密度;
- $\omega_{\text{WTR}}$ ——风力机角速度, 单位为弧度每秒 (rad/s)。

6.4.1 传动链模型应能准确模拟该部分动态过程对风电机组电气性能的影响, 可采用如图 6 所示的两质量块模型。

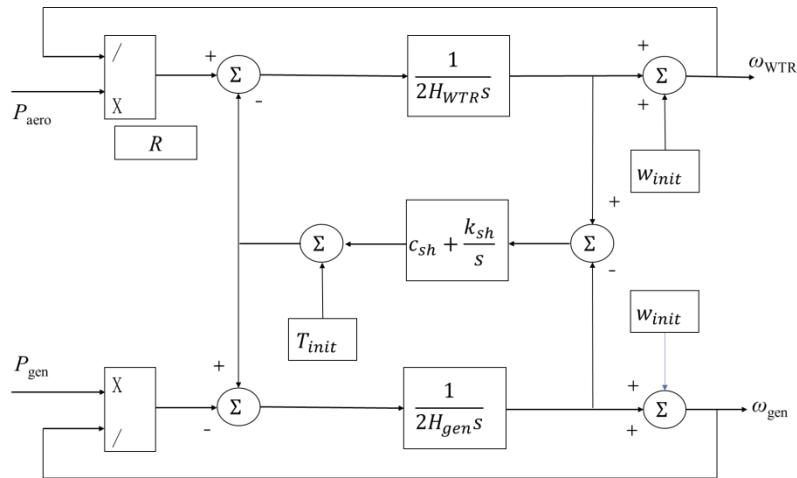


图 6 传动链两质量块模型

说明：

$c_{sh}$ ——传动链周希阻尼系数，单位为牛米每弧度 (Nm/rad)；

$P_{aero}$ ——风电机组捕获的风功率，单位为瓦 (W)；

$P_{gen}$ ——发电机有功功率，单位为瓦 (W)；

$\omega_{gen}$ ——发电机角速度，单位为弧度每秒 (rad/s)；

$\omega_{init}$ ——风力机初始角速度，单位为弧度每秒 (rad/s)。

6.4.2 变桨系统模型可等效为一阶惯性环节，模型如图 7 所示。

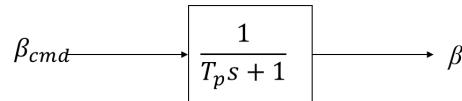


图 7 变桨系统等效模型

说明：

$\beta_{cmd}$ ——主控制系统桨距角指令，单位为度 (°)。

$T_p s$ ——时间常数。

6.4.3 发电机变流器系统模型

6.4.3.1 1型、2型和3型风电机组中的发电机模型可采用仿真软件中的标准发电机模型，模型应包括转子磁链暂态特性，并根据风电机组低电压穿越特性和建模需求特性考虑定子磁链暂态特性。

6.4.3.2 变流器包括3型和4型风电机组的机侧变流器和网侧变流器。变流器若加装低电压穿越保护电路[如撬棒和直流斩波电路]，模型应准确模拟其动态特性，并能反映保护电路的过载能力；变流器控制系统应根据实际控制策略准确建模。

6.4.4 控制系统模型

控制系统模型应根据实际控制策略准确建模。主要包括最大功率跟踪、恒功率运行控制、有功功率调节、无功功率调节、桨距控制以及与故障穿越相关的控制模块。

6.4.5 保护模块模型

风电机组的过/欠压保护、过/欠频保护应准确建模，其他与故障穿越过程相关的保护如超速保护、电流保护以及滑差保护等在模型中体现。可专门建立保护模块，或包含于其他电气部件模型中。

## 7 光伏发电单元模型

### 7.1 通用原则

光伏发电单元建模应符合的 GB/T 32826《光伏发电系统建模导则》GB/T 32892《光伏发电系统模型及参数测试》规程规定。

7.1.1 本文件中具体的建模对象为光伏方阵、逆变器等设备元件组成的光伏发电单元子模块，对常规设备元件模型不作讨论。图 8 与图 9 为光伏发电单元两种典型结构。

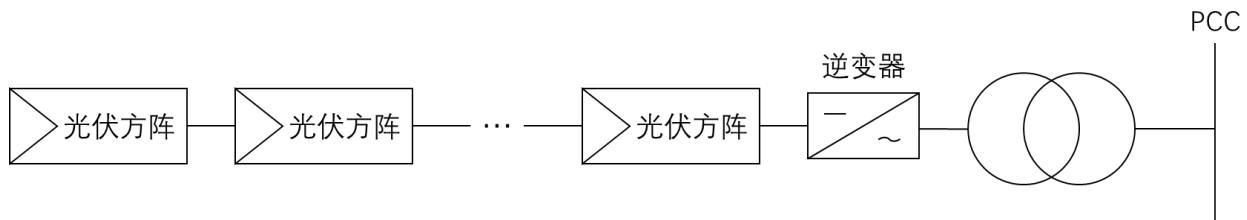


图 8 光伏发电单元典型结构一

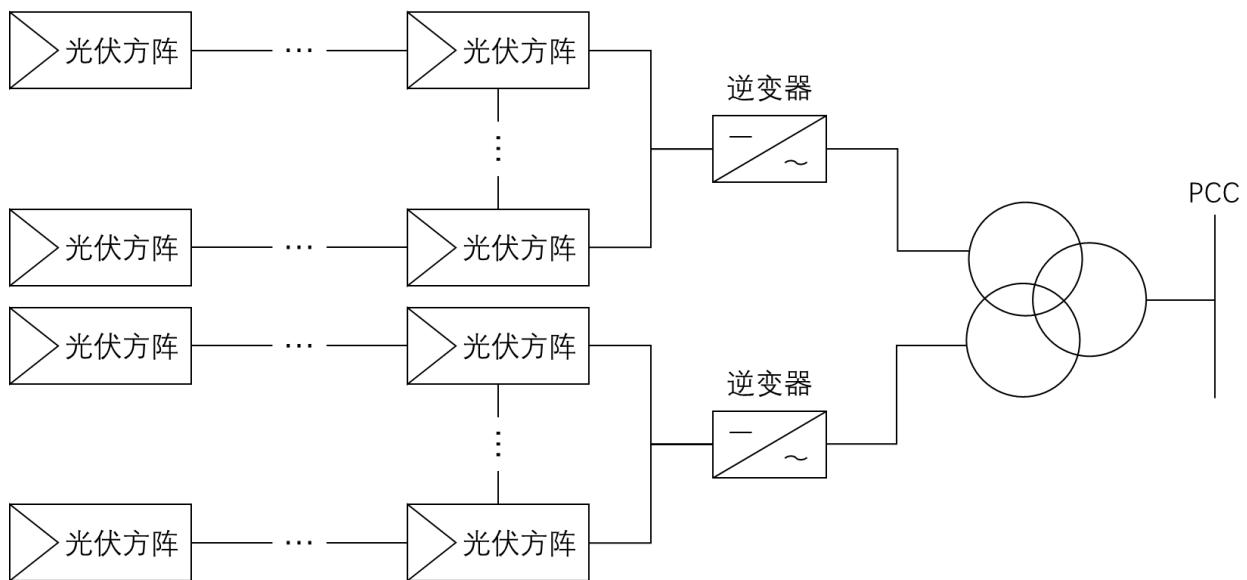


图 9 光伏发电单元典型结构二

7.1.2 光伏发电模型应包含运行中对并网性能有明显性影响的部件，包括光伏板、电气部件、控制等模块。

7.1.3 光伏方阵模型模拟不同辐照度和温度下光伏方阵的光电转换特性，任意辐照强度和工作温度下的光伏方阵模型可参考 GB/T 32826《光伏发电系统建模导则》。

7.1.4 对逆变器进行详细建模时，应包括空间矢量脉宽调制、直流侧电容、逆变器有功和无功控制、故障穿越控制、逆变器电压电流和频率保护以及最大功率点跟踪控制等，同时，应关注逆变器开关驱动过程。

7.1.5 宜根据光伏发电系统接入电压等级确定单机模型中升压变压器级数。

## 7.2 模型接口和初始化

### 7.2.1 光伏模型接口应至少包括以下变量和参数:

- a) 面板上的光照强度瞬时值;
- b) 电池运行温度瞬时值;
- c) 光伏阵列的输出电压;
- d) 光伏阵列的输出电流;
- e) 运行模式参数、控制器参数;
- f) 模型额定参数;
- g) 模型初始化参数。

7.2.2 对于不同类型、不同容量的光伏方阵、逆变器构成的光伏发电单元应分别建立初始化模型，在此基础上进一步建立光伏发电系统的详细模型；为保证模型验证和参数测试可信度，光伏发电单元模型外特性宜通过实测数据获得。

## 8 静止无功发生器模型

### 8.1 通用原则

8.1.1 静止无功发生器根据结构的不同，可分为直挂式和升压式两种，模型主电路结构应与实际工程用设备保持一致。

8.1.2 静止无功发生器模型的控制器参数，宜采用实际投产设备控制器参数，如不具备相应条件，可选择设计参数。

8.1.3 静止无功发生器模型运行模式，宜具备恒输出无功模式、恒功率因数模式、恒电压模式以及阻尼振荡模式。同时，根据现场设备具体运行模式，应保证模型运行模式与实际设备运行模式一致。

### 8.2 模型接口和初始化

#### 8.2.1 模型接口

静止无功发生器模型输入为母线电流和电压，输出为无功电流。静止无功发生器模型应能接受控制指令设定值，包括无功功率、电压设定值。

#### 8.2.2 模型初始化

静止无功发生器模型初始化过程如下，首先确定模型运行模式，根据潮流计算结果，获得母线电压幅值和相角、有功功率和无功功率。根据初始值确定模型初始运行参数。然后，确定控制指令，包括无功功率或电压指令等。最后，进行模型控制模块的初始化。

### 8.3 静止无功发生器模型

静止无功发生器模型如图 10 所示，应包括变压器模型（可选）、电抗器模型（可选）、电压源型换流器模型以及控制与保护系统模型组成。

#### 8.3.1 直挂式静止无功发生器模型

直挂式无功发生器模型如图 10 所示，应包括电抗器模型、电压源型换流器模型以及控制与保护系统模型组成。

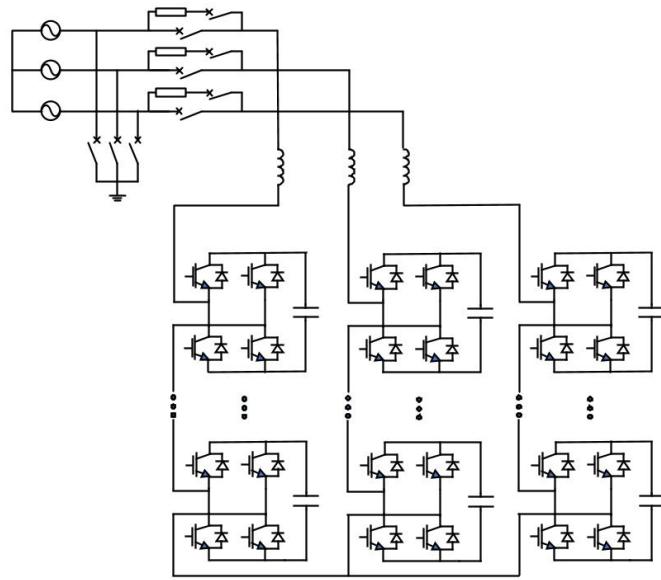


图 10 直挂式静止无功发生器模型结构

### 8.3.2 升压式静止无功发生器模型结构

升压式静止无功发生器模型如图 11 所示，应包括变压器模型、电抗器模型、电压源型换流器模型以及控制与保护系统模型组成。

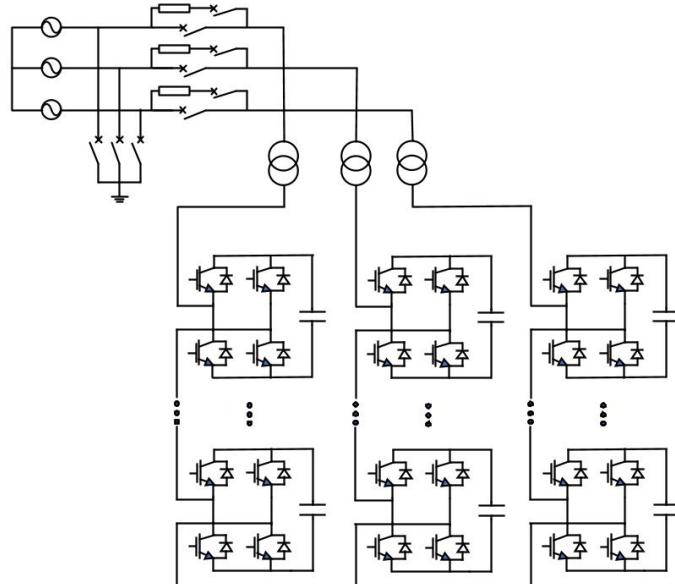


图 11 升压式静止无功发生器模型结构

## 8.4 子模块模型

### 8.4.1 无功补偿装置模型

8.4.1.1 并联电容器装置模型应选择理想电容模型。

8.4.1.2 并联电抗器装置模型应选择理想电抗模型。

8.4.1.3 并联电容器装置和（或）并联电抗器组成的无功补偿装置分星接式和角接式，应根据实际设备情况进行建模。

#### 8.4.2 换流链模型

8.4.2.1 进行大型火电新能源耦合发电系统或同类电力系统暂态仿真计算和分析时，换流链模型应采用电磁暂态开关均值模型。

8.4.2.2 进行大型火电新能源耦合发电系统或同类电力系统子系统暂态仿真计算和分析时，换流链模型应采用电磁暂态分段线性化模型。

#### 8.4.2.3 控制器模型

控制器控制策略应包括电压控制策略、无功功率控制策略、电压/无功综合控制策略、故障穿越控制策略以及异常闭锁策略。

### 8.5 静态无功补偿器

8.5.1 静态无功补偿器模型，宜采用理想电容模型。

8.5.2 静态无功补偿器模型应具备控制接口，根据系统运行方式进行投/切动作。

### 8.6 静止无功补偿器

8.6.1 静止无功补偿器可分为晶闸管投切电容器型，晶闸管控制电抗器型以及电容器与电抗器组合型，宜根据实际投产设备搭建静止无功补偿器模型。

## 9 负荷模型

9.1 应用于电气仿真计算的负荷模型可采用综合静态模型或综合动态模型，宜采用电机模型或综合指数模型这类综合动态模型。

9.2 对于应用于大系统电磁暂态仿真计算的模型，可根据仿真计算实际情况，可用负荷等效电路替代。

9.3 各计算单位应根据所计算对象的具体情况决定负荷模型的组成和参数。

9.4 厂用电负荷应按电动机负荷考虑。

## 10 输电线路模型

### 10.1 概述

10.1.1 在进行输电线路建模时，行波周期小于仿真步长时，宜采用PI型集中式模型。

10.1.2 在关注输电线所有的频率相关效应时，宜采用频率相关相域模型。

10.1.3 用于宽频振荡仿真的输电线路模型宜采用频率相关相域模型，并选择合适的塔型、电缆结构模型和地平面元件。

10.1.4 输电线路模型由两部分表示：1. 输电线路自身的定义，包括导纳、阻抗数据或导体以及绝缘属性，对地阻抗数据以及所有塔和导体的几何位置；2. 通过电气接口原件与电气系统其余部分连接，如果输电线路配置为直接连接模式，则不需要接口元件。

### 10.2 架空输电线路模型

10.2.1 输电线路建模时，需要选择塔型和地平面元件，并根据不同的塔型进行参数输入。

10.2.2 电磁暂态仿真软件中提供了多种已创建的输电线路塔模型。塔原件用于在输电线路段定义编辑器中定义输电线系统的几何布置。

10.2.3 按导线实际形式选择为实心、空心或绞线。

10.2.4 组合导线的外半径计算方法：如果是绞线，则该值是从中心到外层导线股边缘的半径。当存在分裂导线时，该值是分裂导线中各个子导线的外半径。

10.2.5 正确设置其他参数：

- a) 设置导线的直流电阻、相对磁导率、导线弧垂；
- b) 设置接地线的外半径、直流电阻、相对磁导率、弧垂；
- c) 亦可采用通用塔模型，用 XY 坐标的形式输入导线几何数据。

### 10.3 地下电缆模型

10.3.1 电缆系统不支持直接连接模式，只能选择远方终止模式，并添加两个电缆接口原件。

10.3.2 应选择频率相关相域模型和频率相关模态域模型。

10.3.3 电缆配置元件用于定义电缆走廊的基本属性，并提供访问输电段定义编辑器的接口。电缆接口元件用于确定并提供输电走廊每一端电气连接的数目。电缆配置元件必须与电缆接口原件一起使用。

10.3.4 输入系统的稳态频率。该参数仅用于使用频率相关线性模型时在输出文件中进行显示。当直流时输入 0。

10.3.5 同轴电缆模型用于定义实心导体，且可具有最多 3 条共心导体，每条导线由绝缘层分隔。电缆的截面用于在输电段定义编辑器内定义电缆系统的几何位置以及导体/绝缘体的属性。

10.3.6 正确设置其他参数：

- a) 设置正确的电缆环境（位于地下或空气中）、埋深、各层厚度、交叉互联情况；
- b) 设置各导电层正确的电阻率、相对磁导率、内半径、外半径、厚度；
- c) 设置半导体层；
- d) 设置绝缘层相对介电常数、相对磁导率、外半径、厚度。

## 11 变压器模型

### 11.1 概述

11.1.1 变压器有两种主要的建模方法，即经典建模法和磁等效电路方法。

11.1.2 经典模型限于单相单元，不同的绕组均位于同一铁芯柱上，即每一相为分开的单相变压器，且相间无交互。

11.1.3 磁等效电路模型考虑了铁芯尺寸，并能表示相间耦合，即计入了相间交互，可精确模拟 3 相 3 柱和 3 相 5 柱变压器。

11.1.4 如需关注变压器内相间交互作用，考虑相间耦合特性，宜使用磁等效电路法进行建模。

### 11.2 经典模型

铁芯非线性特性基于膝点、空心电抗以及额定电压下的励磁电流进行近似，即通过在所选择的绕组端子上注入补偿电流源。

### 11.3 磁等效电路模型

铁芯特性是直接在模型中以 V-I 曲线的形式输入，采用完全插补的分段线性化方法。磁等效电路模型未配备有载切换分接头，该模型的特定绕组上具有分接头设置，但在运行过程中不能动态的改变。

## 12 其他常用设备模型

### 12.1 高压电抗器模型

高压电抗器可采用理想电抗器模型，即可采用固定电抗器模型。

### 12.2 串联电容补偿器模型

串联补偿电容可采用理想电容器模型，即可采用固定电容器模型。

### 12.3 阻塞滤波器模型

阻塞滤波器模型可按附录 A 建立，且阻塞滤波器内电容、电感应采用理想电容器和理想电感器模型，如图 12 所示。

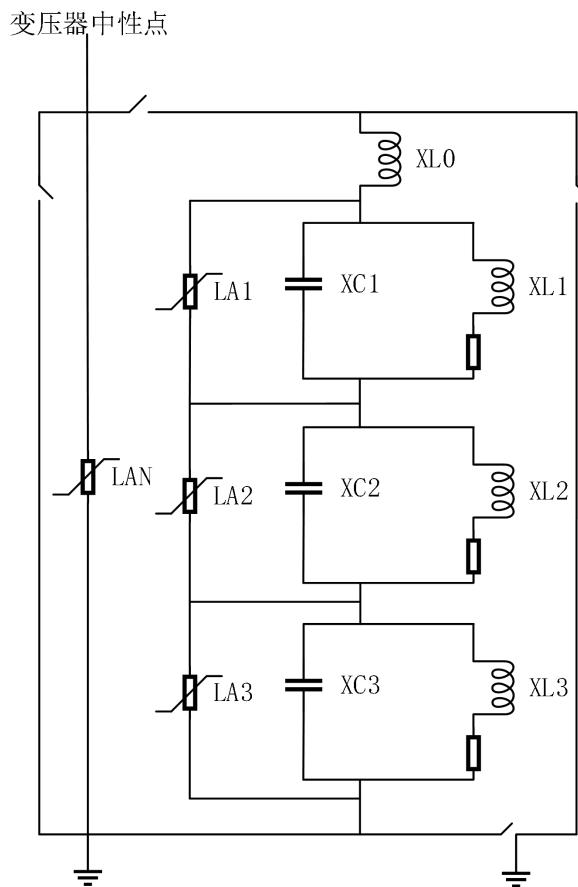


图 12 典型阻塞滤波器结构图

附录 A  
(资料性)  
参数收集

#### A. 1 同步发电机组发电机模型参数

同步发电机组发电机模型所需参数见表 A.1。

表 A. 1 同步发电机组发电机模型参数表

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
1	额定容量		MVA		
2	定子额定电压		kV		
3	定子每相直流电阻		$\Omega$		
4	直轴同步电抗	$X_{du}$	%		
5	横轴同步电抗	$X_{qu}$	%		
6	直轴瞬变电抗	$X'_{du}$	%		
7	横轴瞬变电抗	$X'_{qu}$	%		
8	直轴超瞬变电抗	$X''_{du}$	%		
9	横轴超瞬变电抗	$X''_{qu}$	%		
10	定子漏电抗		%		
11	直轴开路瞬变时间常数	$T'_{d0}$	s		
12	横轴开路瞬变时间常数	$T'_{q0}$	s		
13	直轴开路超瞬变时间常数	$T''_{d0}$	s		
14	横轴开路超瞬变时间常数	$T''_{q0}$	s		

#### A. 2 轴系多质量块弹簧模型参数

轴系多质量块弹簧模型所需参数可见表 A. 2。

表 A. 2 轴系多质量块弹簧模型参数表

编号	集中质量模块	惯性常数 (p. u)	入/出功率 (MW)	质块	块间等效弹簧弹性常数 (p. u)	备注
1	高压缸					
2	中压缸 (可选)					
3	低压缸					

编号	集中质量模块	惯性常数 (p. u)	入/出功率 (MW)	质块	块间等效弹簧弹性常数 (p. u)	备注
4	低压缸 (可选)					

### A. 3 发电机组轴系扭振的频率和振型参数

发电机组轴系扭振的频率和振型所需参数可见表 A. 3。

表 A. 3 发电机组轴系扭振的频率和振型参数表

模态编号		1	2	3 (可选)
固有频率 (Hz)				
集中质量点振型	高压缸			
	中压缸 (可选)			
	低压缸			
	低压缸 (可选)			
	发电机			

### A. 4 同步发电机组模态阻尼参数

同步发电机组模态阻尼所需参数可见表 A. 4。

表 A. 4 同步发电机组模态阻尼参数表

模态	0%	40%	100%
1			
2			
3			

### A. 5 同步发电机组励磁系统建模参数

同步发电机励磁系统建模所需参数可见表 A. 5。

表 A. 5 同步发电机励磁系统建模参数表

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
1	调差系数	$X_c$	标幺值		
2	调节器输入滤波器时间常数	$T_r$	s		
3	调节器最大内部电压	$V_{AMAX}$	标幺值		
4	调节器最小内部电压	$V_{AMIN}$	标幺值		
5	电压调节器超前时间常数	$T_1$	s		
6	电压调节器滞后时间常数	$T_2$	s		

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
7	电压调节器超前时间常数	$T_3$	s		
8	电压调节器滞后时间常数	$T_4$	s		
9	电压调节器放大器增益	$K_a$	标幺值		
	调节器 PID 增益	$K$	标幺值		
	积分选择因子	$K_v$	标幺值		
	电压调节器放大器时间常数	$T_a$	s		
	软负反馈放大倍数	$K_f$	标幺值		
	软负反馈时间常数	$T_f$	s		
	电压调节器最大输出电压	$V_{RMAX}$	标幺值		
	电压调节器最小输出电压	$V_{RMIN}$	标幺值		
	换相电抗的整流器负载因子	$K_C$	标幺值		

#### A. 6 变压器模型参数

变压器模型所需参数可见表 A. 6。

表 A. 6 变压器模型参数表

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
1	各绕组额定电压		kV		
2	额定变比				
3	绕组接线方式				
4	短路电压百分比		$U_k \%$		
5	空载损耗		kW		
6	空载电流		$I_0 \%$		
7	抽头位置				
8	负载损耗/短路损耗		kW		
9	短路阻抗				

#### A. 7 逆变器模型参数

逆变器模型参数见 A. 7。

表 A.7 逆变器模型参数表

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
1	逆变器型号				
2	额定输出功率		kW		
3	最大输出功率		kW		
4	输出电压范围		V <sub>ac</sub>		
5	最大直流输入电压		V		
6	最小输出功率		kW		
7	最大直流输入功率		kW		
8	最低启动电压 (可稳定运行)		V		
9	最大输出电流		A		
10	低电压穿越功能				

A.8 静止无功发生器建模所需参数见表A.8

静止无功发生器建模所需参数见表 A.8。

表 A.8 静止无功发生器建模参数表

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
1	额定容量		MVar		
2	额定电压		V		
3	变流器输出电压/电流		$kV_{rms} / A_p$		
4	连接电抗器		mH		
5	开关器件类型				
6	控制方式				
7	载波频率		Hz		
8	角度控制 PI 环节比例系数				
9	积分时间常数				

A.9 输电线路建模所需参数见表A.9

输电线路建模所需参数见表 A.9。

表 A.9 输电线路建模参数表

编号	参数名称	符号	单位	数值	备注
1	正序电阻		$\Omega / km$		
2	正序电抗		$\Omega / km$		
3	正序电容		$\mu F / km$		
4	零序电阻		$\Omega / km$		
5	零序电抗		$\Omega / km$		
6	零序电容		$\mu F / km$		
7	线路长度		km		

## A. 10 阻塞滤波器建模所需参数见A. 10

阻塞滤波器建模所需参数见 A.10。

表 A. 10 阻塞滤波器建模参数表

阶数	0 阶	1 阶	2 阶
电容器正常参数 ( $\mu$ F)			
电抗器正常参数 ( mH)			
电抗器原电阻 ( $\Omega$ )			
电抗器原 Q 值			
电抗器回路总电阻 ( $\Omega$ )			
电抗器串电阻后 Q 值			

### 参 考 文 献

- [1] 任永峰, 安中全, 李静立等. 双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制 [M]. 机械工业出版社:201107. 233.
- [2] 李维波. 电力电子装置建模分析与示例设计 [M]. 机械工业出版社:202106. 209.