**规模化新能源基地的宽频模型**

**1. 永磁直驱风机发电机模型(PMSG)-15阶**

本节建立直驱风机线性化状态空间模型。直驱风机的基本原理和构成如图1-1所示，共包含五个部分：1）永磁同步发电机及其传动系统、2）机侧换流器及其控制系统、3）网侧换流器及其控制系统、4）直流电容和5）锁相环。永磁同步发电机及其传动系统实现风能-机械能-电能的转换过程，传动系统将风力机和永磁同步发电机转子连接。机侧换流器及其控制系统控制感应发电机输出的有功功率和无功功率。网侧换流器及其控制系统控制直流电容电压和网侧换流器向交流电网注入的无功功率。锁相环通过快速追踪直驱风机并网点电压的频率和相位，为机侧换流器和网侧换流器控制提供参考坐标系。



**图1‑1直驱风机结构示意图**

**1.1 永磁同步发电机（3阶）**

为了建立永磁同步发电机的*dq*数学模型，假设：(1)忽略漏磁通的影响；(2)不考虑磁饱和现象；(3)磁滞及涡流损耗不计；(4)转子磁链在气隙中呈正弦分布；(5)永磁材料的电导率为零。参考图1‑所示的电流方向（发电机惯例），永磁机转子的直轴和交轴分别为*d*轴和*q*轴进行派克变换，得到*d-q*坐标下定子绕组电压方程：



式中：、、、、、是定子绕组磁通，定子绕组电压，定子绕组电流的*d-q*轴分量；是定子绕组电阻，是电力系统工频角频率，是永磁同步机转子角速度。下标*dq*分别表示在*dq*坐标系下的分量。

将式线性化可得：



永磁机的转子运动方程(采用单质量块模型)为：



式中：和表示转子的机械转矩和电磁转矩，代表永磁机转子惯性常数，电磁转矩。

将式线性化可得：



永磁机的定子绕组磁链方程为



式中：、分别表示定子绕组的轴电抗；表示永磁体的磁通。

将式线性化可得：



将式代入并忽略定子绕组电阻可得：



公式到为永磁同步机的动态数学模型，现将其线性化：

将线性化可得：



忽略永磁机转子输入机械功率变化，将式线性化得：



将式代入电磁转矩方程并线性化得：



将代入得：



将和合并写成矩阵形式得：



其中。

机侧换流器从永磁同步机吸收的有功功率为：



将线性化得：



将式和合并，写成矩阵形式，得到永磁机的线性化状态空间模型：



其中：，表示永磁机系统的线性化状态空间矩阵；、、、、表示永磁机系统的系数矩阵或系数向量。

**1.2 机侧换流器及其控制系统（3阶）**

机侧换流器控制系统结构如图1-2所示，永磁风机的机侧换流器采用矢量控制，其目的是通过控制发电机转速从而控制发电机的输出有功功率：机侧换流器控制系统将机侧定子绕组*d*轴电流控制为0，此时电磁转矩仅和定子绕组*q*轴电流相关，即可以通过仅控制以达到控制发电机输出功率的目的。



**图1-2 机侧换流器控制系统框图**

机侧换流器控制系统由三个部分组成，分别为转速外环控制，*q*轴电流内环控制，*d*轴电流内环控制。转速外环控制调控永磁机转子角速度；*q*轴电流内环控制调控永磁机定子绕组*q*轴电流；*d*轴电流内环控制调控永磁机定子绕组*d*轴电流。机侧换流器控制系统的动态方程为:



式中：为各积分控制器的输出；，，为积分控制器放大倍数；为比例控制器放大倍数；为永磁机定子绕组*q*轴电流控制的参考值；是永磁机转子角速度参考值。下标*ref*代表对应变量的整定值。

机侧换流器控制的代数方程为:



式中和为比例控制器放大倍数；和是机侧换流器输出电压的轴分量。换流器PWM采用平均模型：



式-为机侧换流器及其控制系统的数学模型。忽略永磁同步机的机侧换流器控制系统中的转子角速度控制参考值的变化和永磁同步机定子绕组d轴电流控制参考值的变化。

将式线性化得：



将式线性化得：



将式线性化得：



将式和合并写成矩阵形式，可以得到机侧换流器及其控制系统的线性化状态空间方程：



其中。表示机侧换流器及其控制系统的线性化状态空间矩阵；、、、、表示机侧换流器及其控制系统的系数矩阵或系数向量。

**1.3 网侧换流器及其控制系统（7阶）**

如图1-3所示为网侧换流器控制系统框图，其控制目标是控制直流电容电压稳定，从而保证永磁风机输送平稳的有功功率。控制环节有两个外环控制两个内环控制构成：直流外环电压控制调节直流电容电压；无功外环控制调节网侧换流器注入电网的无功；*d-q*轴电流内环控制调节网侧换流器交流侧*d-q*轴电流。正常工况运行状况下，无功功率给定值为0，即令风机不发无功；当检测到电网正序电压低于额定电压的90%时，进入低电压穿越状态。



**图1-3 网侧换流器控制系统框图**

网侧换流器控制系统动态方程为:



式中：、、、分别是各环节的积分放大倍数；、为PI环节的比例放大倍数；为PI环节的积分输出；为直流电容电压；为直流电容电压参考值；为换流器输出无功，为换流器输出无功参考值；和为网侧换流器电网侧*d-q*轴分量。

将式线性化可得：



动态方程中的代数方程为:



式中：，为PI环节的比例放大倍数；为滤波电抗；和为并网点电压*d-q*轴分量。

网侧换流器端口滤波电抗上的电压方程为：



其中：*Vn*表示网侧换流器端口电压；*Vw*表示直驱风机并网点电压。*Xm*代表滤波电抗值。

将式线性化后可得：



换流器脉宽调制采用平均值模型，即：



将式线性化可得：



机侧换流器和网侧换流器之间通过一直流电容连接，直流电容动态方程为电容*C*功率方程为：



其中：*Vdc*表示直流母线电压；*C*表示直流电容；*Pn*表示直流侧输入到网侧换流器的有功功率，*Pm*表示机侧换流器到直流侧的有功功率。

将式线性化可得：



换流器输出有功和无功为：



将式线性化可得：



将和代入并且线性化后可得：



将线性化，再将代入得



将线性化，再将线性化和代入得到状态方程。

将线性化，再将线性化后代入得到状态方程。

将式、状态方程、状态方程合并写成矩阵形式得：



式中：。表示网侧换流器及其控制系统以及直流侧电容的线性化状态空间矩阵；、、表示网侧换流器及其控制系统以及直流侧电容的系数矩阵或系数向量。

将、及合并得单台永磁直驱风机状态空间模型：



其中：

**1.4 锁相环模型（2阶）**

锁相环通过追踪双馈风机定子端电压相位，为转子侧换流器和网侧换流器矢量控制提供参考坐标系。以最基本也是最常用的三相同步锁相环(Synchronous Reference Frame Phase-locked Loop,SRF-PLL)为例，建立锁相环模型。矢量控制需要确定的*d*-*q*坐标系与电网*x*-*y*坐标系的相对位置。根据一般性，选择直驱风机端电压在*x*-*y*坐标下的方向作为*d*-*q*坐标的*d*轴方向。锁相环的任务是实时跟踪端口电压相位，其具体构成和原理如图1-4与图1-5所示。其中是锁相环实测相位，是实际相位，锁相环误差为。为简化控制算法，应用空间坐标变换，将同步旋转*dq*坐标系d轴定向于电网电压矢量的方向上，得电网电压的*dq*分量：当锁相环误差为0时，直驱风机端电压与*d*轴重合。

锁相环最常用的是三相同步锁相环，其模型方框图如图1-5所示，其中为风机并网点电压幅值，和为PI控制器比例和积分增益，是积分控制器的输出。



**图1‑4锁相环工作原理**



**图1‑5锁相环控制框图**

下面结合图1-4简要说明锁相环的工作原理，其中*x*-*y*坐标系为交流电网公共旋转坐标系，*d*-*q*坐标系为锁相环给出的矢量控制旋转坐标系；表示公共*x*-*y*坐标系下双馈风机定子端电压的相位，表示公共*x*-*y*坐标系下锁相环输出相角；表示公共*x*-*y*坐标系下双馈风机定子端电压；以锁相环输出相角为*d*轴*x-y*坐标系下的相位，进行派克变换，得到双馈风机定子端电压在锁相环给出的*d*-*q*坐标系下为。动态过程中，锁相环PI控制器不断调整*d*-*q*坐标系在公共*x*-*y*坐标系下的相对位置，使得*d*轴与双馈风机端电压位置重合，即使得双馈风机定子端电压*d*轴分量为端电压幅值、*q*轴分量为0，从而，使得锁相环输出相角即为为双馈风机端电压在公共*x*-*y*坐标系下的相位，并实现有功功率和无功功率的解耦控制。稳态时，有，下标0表示变量稳态值。

根据图1-4，锁相环动态模型为，



将式线性化，可得锁相环线性化状态空间模型为：





其中，，，上标T表示向量或矩阵的转置；表示锁相环线性化状态空间矩阵，和表示系数矩阵或系数向量。

此前各小节建立了永磁直驱风机各部分的线性化状态空间模型，将式联立，可得，



其中：

；表示*d*-*q*坐标系下直驱风机的输出电流。

式所示线性化状态空间模型的输入（）和输出（）均表示在*d*-*q*坐标系下，为便于推导风电场线性化模型，需首先将式(1-22)中模型的输入输出转换到公共*x*-*y*坐标系下。

由图1-3，*x*-*y*和*d*-*q*坐标系下表示的变量间的变换关系如下，





将式线性化并写为矩阵形式：



其中，；；；；；。

由式，将式中线性化状态空间模型的输入和输出转换到公共*x*-*y*坐标系下，有



其中，，；和表示公共*x*-*y*坐标系下，直驱风机端电压和输出电流。

将式代入式，可得直驱风机线性化状态空间模型为，



其中：表示直驱风机线性化状态空间矩阵，、表示系数矩阵或系数向量。

**2. 双馈感应风力发电机(DFIG)-15阶**



**图2‑1双馈风机结构示意图**

双馈风机结构示意图如图2-1所示，其由三个部分构成：异步感应发电机及其传动系统；机侧换流器及其控制系统；网侧换流器及其控制系统。异步机及其传动系统将风能转化为机械能(根据贝茨理论可以得到，当风流过风力机的时候，风力机的叶片并不会将全部的风能都吸收并且进行转化，其只能吸收其中的一部分动能，而流过风力机的气流会带走其他动能)，再由定子将机械能转化为电能直接输送给电网；机侧换流器控制系统控制异步机输出的功率；网侧换流器及其控制系统控制直流电容电压，并保证网侧换流器向电网注入无功为零。

**2.1 异步电机及其传动系统模型（3阶）**

给出异步发电机定子和转子绕组电压方程：



将式线性化可得：



式为异步发电机定子和转子绕组的磁链方程：



其中，、分别表示定子绕组自电抗和定、转子绕组互电抗；表示转子绕组自电抗。

将线性化可得：



忽略双馈感应发电机定子磁链的电磁暂态过程，结合消去*Ird*和*Irq*，并整理得到*Isd*、*Isq*和、表示的转子绕组电压和定子绕组电压方程为：



将式线性化可得：



定义双馈感应发电机暂态电势在*d*轴和*q*轴上的分量为：



研究常选用的感应电机模型是忽略定子磁链快速暂态过程的3阶模型。在此基础上，提出了感应电机简化2阶模型，并指出感应电机简化模型具有良好的适用性以及较高的分析精确度。为方便大规模风电场仿真，本文双馈风机定子侧忽略了定子暂态的二阶模型。此时，其定转子方程可写为异步电机及其传动系统的定子直接与电网连接提供交流电能，转子经变流器再接入电网，本文分析采用异步电机二阶实用动态模型为下式：



将式线性化可得：



异步电机轴系传统系统采用单质块模型，即：



将式线性化可得：



其中和为*d*-*q*轴暂态电势，为转子电阻，；为激磁电抗，为转子绕组漏抗；和为定子绕组电流和转子绕组电压的轴分量；为转子惯性时间常数；为转子转速；分别为转子机械转矩和电磁转矩，标幺值下为转差率，为电磁转矩：



将式线性化可得：



忽略定子电阻，双馈风机定子电压和定子电流之间的关系为



其中=；；。

将式-线性化后合并写成矩阵形式得到异步机及其传动系统线性化模型



其中，，。表示永磁机系统的线性化状态空间矩阵；、、表示异步电机及其传动系统模型的系数矩阵或系数向量。

**2.2 转子侧换流器及其控制系统模型（4阶）**



**图2‑2转子侧换流器控制框图**

转子侧换流器及其控制系统如图1-7所示，由两个外环控制和两个内环控制组成：有功外环控制和无功外环控制调节定子输出有功和无功，*d*轴电流内环控制和*q*轴电流内环控制调节定子电流*d、q*轴分量。

转子侧换流器控制系统动态方程为：



其中，，，分别是各PI环节的积分放大倍数；为PI环节的积分输出；和为转子电流*d、q*轴分量参考值；和为定子输出有功和无功的参考值。

将式线性化后可得：



动态方程中的代数方程为：



其中，，，分别是各PI环节的比例放大倍数；、为定子绕组*d、q*轴电流控制参考值；、分别表示转子侧换流器控制器输出的控制参考电压。

将式线性化后可得：



换流器脉宽调制采用平均值模型：



将式线性化后可得：



定子侧输出的有功和无功可以表示为：



将式线性化后可得：



仿照直驱风机的机侧换流器线性化模型，将式到线性化合并，写成矩阵形式可以得到双馈风机的转子侧换流器及其控制系统的线性化状态模型。



其中。表示转子侧换流器及其控制系统的线性化状态空间矩阵；、、、、、、表示转子侧换流器及其控制系统的系数矩阵或系数向量。

**2.3 网侧换流器及其控制系统模型（6阶）**



**图2‑3 网侧换流器控制框图**

双馈感应风机网侧换流器控制框图如图2-3所示，内环控制网侧换流器输出到外部系统的电流在*q*、*d*轴上的分量和，外环负责控制直流电容电压。

网侧换流器控制系统动态方程为:





动态方程照中的代数方程为：



其中，.为环节的积分输出；，，分别是各PI环节的积分放大倍数；，，分别是各PI环节的比例放大倍数；为直流电容电压；为直流电容电压参考值；和为交流侧*d*-*q*轴电流；为滤波电抗。

换流器采用脉宽调制平均模型



将式线性化后可得：



网侧换流器端口滤波电抗上电压方程为：



将式线性化后可得：



转子侧换流器和网侧换流器之间通过一直流电容连接，直流电容动态方程为：



将式线性化后可得：



其中和为网侧换流器*d*-*q*轴电压；为网侧换流器向电容注入的有功功率；为网侧换流器吸收功率。



将式线性化后可得：



仿照直驱风机网侧换流器线性化模型，将式到线性化并列写成矩阵形式，可以得到双馈风机的网侧换流器及其控制系统线性化状态模型。



其中：表示网侧侧换流器及其控制系统的线性化状态空间矩阵；、、、、表示网侧换流器及其控制系统的系数矩阵或系数向量。

将式、和合并得到双馈风机全阶线性化状态空间模型



**2.4 锁相环控制环节（2阶）**

锁相环具体工作原理已在直驱风机模型中已经介绍，将式中表示直驱风机端电压的变量替换为双馈风机端电压，便可建立双馈风机锁相环模型：



将式线性化后可得：



将式代入双馈风机的接口电压电流转化为*x*-*y*坐标下变量，再与锁相环模型合并可以得到带有锁相环的双馈风机模型：





其中，，。表示双馈感应风机线性化状态空间矩阵，、和表示系数矩阵或系数向量。

**3. 光伏系统模型(PV)-12阶**

多台型号相同的光伏发电单元聚合，其中辐照度和温度均采用标准工况对应值，其控制参数与运行状态均保持一致。考虑到实际工程中大规模光伏电站多采用结构简单、损耗较小、成本较低的单级式并网光伏发电系统结构，研究系统中的并网光伏逆变器采用双级式拓扑，控制策略采用基于电网电压定向的矢量控制策略。集中双级式光伏电站主要包括光伏阵列、DC/DC升压变换器(Boost)、直流侧电容、逆变器、滤波器、Boost控制､逆变器控制和锁相环，其建模假设：①不考虑交流侧滤波电容影响；②只计及电网电抗的影响；③逆变器传输功率无损耗。

**图3-1光伏模型框图**

**3.1 光伏电池电路模型（1阶）**

光伏系统的主电路部分包括图3-1中的光伏阵列、DC-DCBoost、直流侧电容、逆变器和滤波器，其详细的电路图如图1-9所示｡



光伏电池厂家为用户提供标准工况下的5个电气参数（*I*m、*I*sc、*U*m、*U*oc、*P*m），由式即可求取标准工况下的输出特性。

由于光伏阵列的电子学精确模型十分复杂,并且部分参数难以直接测量，因此,光伏阵列采用实用化工程模型，该模型基于光伏电池组件的4个己知的出厂参数，标准工况下(*S*ref=1000W/m2、*T*ref=25°C)光伏阵列端口的输出特性由下式所示：



式中：*N*p、*N*s为光伏阵列并联、串联的组件数量，*I*sc、*U*oc为光伏阵列的短路电流、开路电压，*I*m、*U*m为光伏阵列的最大输出电流、最大输出电压，*P*m为光伏阵列最大输出功率。以上参数均可通过光伏电池厂家获得；*C*1、*C*2为待定系数。

该实用化工程模型给出了在实际的光照强度*S*下光伏阵列的伏安关系，根据该光伏工程模型的伏安关系，可以得到光伏阵列的输出功率表达式为，从而求得光伏阵列的最大输出功率，以及最大功率点对应的光伏阵列电压*UM*和电流*IM*：





光伏阵列输出端口并联直流电容的数学模型如下式所示：



式中：*Ppv*为光伏阵列输出功率；*Pg*为光伏系统并网点输出功率。

将式线性化可得：



**3.2 DC/DCBoost模型及其控制系统（4阶）**

DC/DCBoost控制根据光伏系统采用的运行方式的不同有两种控制方式｡当光伏系统采用最大功率跟踪运行方式时，Boost的控制目标是使光伏阵列端电压维持在光伏阵列最大功率点的端电压UM，从而使得光伏系统的输出功率最大｡采用如图3-1所示的框图对该控制过程进行建模。通过PI控制模拟追踪过程,同时，用一阶惯性环节对最大功率点跟踪控制的滞后性进行建模，假设滞后时间为t(单位为*s*)。DC/DCBoost开关的控制信号D由Boost控制部分生成，滤波电感*Lb*满足如下状态方程：



将式线性化可得：



逆变器直流侧电容*CDC*可以起到稳定逆变器直流侧电压的作用，状态方程为：



将式线性化可得：



MPPT控制器采用单环电压控制，控制信号为经MPPT算法得出的光伏阵列电压参考值。DC/DCBoost控制采用最大功率跟踪控制时，Boost控制目标是使光伏阵列端电压*UPV*维持在最大功率点的端电压*UM*，从而使得光伏系统得输出功率最大，其状态方程为：



**图3-2 Boost电路控制框图**



将式线性化可得：



将式-线性化后合并写成矩阵形式得到光伏Boost状态空间模型：



其中，表示DC/DCBoost模型及其控制系统的线性化状态空间矩阵；表示DC/DCBoost模型及其控制系统的系数矩阵或系数向量。

**3.3 DC/AC逆变器及其控制系统（5阶）**

逆变器的作用是将光伏阵列的直流电源转换为交流电源，使光伏发电可以接入交流电力系统。逆变器通常采用电流源控制方式，通过外环电压控制产生逆变器交流侧的电流参考值；和再通过内环电流的双环控制产生逆变器交流侧的端电压的参考值。



**图3-3并网换流器控制框图**

换流器控制系统动态方程为：



将式线性化后可得：



动态方程照中的代数方程为：



式中：为*PI*环节的积分输出；，，分别是各*PI*环节的积分放大倍数；，，分别是各*PI*环节的比例放大倍数；为直流电容电压；为直流电容电压参考值；和为交流侧*d、q*轴电流；为滤波电抗。

将式线性化可得：



由于电力电子器件的动态响应过程极快，换流器采用脉宽调制平均模型：



将线性化可得：



滤波电抗上电压方程为：



将式线性化可得：





将式线性化可得：



除此之外，逆变器直流侧电容两侧的功率平衡方程，起到连接逆变器直流侧和交流侧的模型的关键，其表达式如下：



将式、式代入并整理可得光伏系统网侧换流器及其控制系统的线性化状态空间模型为：



其中：，表示网侧换流器及其控制系统的线性化状态空间矩阵；和表示网侧换流器及其控制系统的系数矩阵或系数向量。

将式合并得到光伏系统全阶线性化状态空间模型



其中：，表示光伏系统的线性化状态空间矩阵；和表示光伏系统的系数矩阵或系数向量。

**3.4 锁相环控制环节（2阶）**

光伏逆变器锁相环控制策略采用基于电网电压定向的矢量控制策略，即光伏机组采用*d*轴电压定位，因此=0。



**图3-4光伏系统锁相环控制框图**





将式线性化后可得：



将光伏系统的接口电压电流转化为*x*-*y*坐标下变量，再与锁相环模型合并可以得到带有锁相环的光伏系统模型：





其中，，，。表示光伏系统线性化状态空间矩阵，、表示系数矩阵或系数向量。

**4. 同步发电机模型(SG)-20阶**

不同于电力系统低频振荡，在研究次同步振荡问题时同步发电机的机械系统占据十分重要的地位，因此需要对同步机轴系进行详细的建模。同步机的实际动态过程十分复杂，为了便于分析，一般采用的是理想同步机模型，所以需要采取一些假设：(1)忽略磁路饱和、趋肤效应、涡流等因素的影响，在这个前提下铁芯的导磁系数可以认为是一个常数；(2)电机的转子结构是对称的；(3)定子三相绕组在结构上是一致的，在空间位置上相差120度电角度，它们在气隙中产生的磁动势都是呈正弦分布的；(4)电机的定子和转子表面是光滑的，不会影响定子和转子的电感系数。只有满足上述的假设条件，这样的同步机才可以认为是理想同步机。

本文所采用的同步机模型是理想同步机模型，包括轴系模型、励磁系统模型和电气部分绕组模型。各部分模型构建如下：

**4.1 同步发电机的数学模型**

同步发电机的动态特性可以用*Park*变换后的电压和磁链方程表征，在*Park*变换后，将同步电机定子上的*a*，*b*和*c*三相电数绕组变换为*d*和*q*两相等效电枢绕组，加上转子上永久短路的两相阻尼绕组D和Q以及励磁绕组*f*，这五个绕组的*Park*电压方程在*d*轴（直轴）和*q*轴（交轴）坐标系统表示为：



其中、、、、，、、、、，、、，、、、分别为同步机各个绕组的磁通磁链、电流、电压和电阻，为同步转速，为转子转速。因为处于*d*轴和*q*轴的绕组之间没有电磁耦合，所以绕组磁链和绕组电流之间的磁链方程为：



其中，、、、、分别为*d、q、f、D*和*Q*绕组的自电抗，并且同步绕组之间的互电抗是相等的，分别为和。

**4.2 典型励磁系统的数学模型**

在研究次同步振荡时，通常情况下同步机的励磁系统影响较小，因此本文采用简化后的三阶励磁模型，典型的三阶励磁系统模型，其传递函数框图如图1-1所示，发电机端电压经测量环节后与给定电压比较，其偏差量进入电压调节器进行放大后，输出电压作为励磁机励磁电压，以控制励磁机的输出电压，即发电机励磁电压。为了励磁系统的稳定运行且改善其动态品质，引入励磁系统负反馈调节，即励磁系统稳定器，一般为一个软反馈环节，又称速度反馈，其输出与励磁电压的变化率有关。



图4-1 典型励磁系统传递函数框图

各个环节的典型传递函数如图4-1所示，1为电压调节器传递函数，2、3为励磁机传递函数，4为励磁负反馈环节。其中，电压调节器一阶，励磁机一阶，励磁负反馈一阶。当参考电压给定时，励磁系统的输入变量为发电机端电压，输出电压为发电机励磁电压，而状态变量为电压调节器输出电压、励磁负反馈电压和发电机励磁电压。在忽略限幅环节作用时，由图可得到相应的三阶励磁系统基本方程



其中、、、、、均已知，稳态工况时,以及微分量均等于0，可得



暂态过程中保持不变，但将随变化。

**4.3 分布集中质量弹簧模型**



图4-2 分段集中质量弹簧模型

通常情况下，根据所研究问题的不同，对同步机轴系的计算精度要求也不尽相同，本文研究的是次同步振荡问题中的轴系扭振问题，同步机的轴系采用的是6段式集中质量-弹簧模型，典型的大型汽轮发电机组的分段集中质量弹簧模型如图4-2所示，1至6分别表示高压缸（HP）、中压缸（IP）、低压缸A（LPA）、低压缸B（LPB）、发电机（GEN）、励磁机（EXC），图中包括了六个刚性集中质量块，作用在每个质量块上的转矩包括原动性的蒸汽驱动转矩或者制动性的电磁转矩、相邻轴段之间传递的扭矩以及阻尼转矩。根据虎克定律和牛顿第二力学定律，可以列出轴系方程





在式中为轴系第*i*个质量块相对于同步旋转参考轴的电气角位移，单位为*rad*；为轴系第*i*个质量块的电气角速度，单位为*rad/s*，和分别为发电机转子的电气角位移和角速度；*Pt*是作用在汽轮机第1个质量块上的原动转矩，*Pe*是作用在发电机质量块上的电磁转矩；*Tji*为第*i*个集中质量块的惯性时间常数，单位为s；*kii+*1为第*i*和*i+*1个集中质量块之间刚度系数的标幺值，单位为*1/rad*；*Dii*代表第*i*个集中质量块的自阻尼系数，*Di*代表第*i*和*i+*1个集中质量块之间的互阻尼系数。稳态运行时各微分量均等于零，可以得到轴系12阶状态变量的稳态值。

综合式、、及得到发电厂模型为：



设电力系统其余部分中包含*N*个动态元件，则其中第个动态元件的线性化状态空间模型为：



其中是第*i*台电气设备状态向量的列向量；表示第*i*个动态元件的节点电压*x*-*y*坐标下变化量；表示第*i*个动态元件的节点注入系统电流想*x*-*y*坐标下变化量;因此电力系统其余部分动态元件的线性化状态空间模型为：



其中



输电网络方程可以表示为



表示风机并网点*x*-*y*坐标下电压变化量；表示风机并网点注入系统电流变化量；其中



是输电网络的节点导纳矩阵。

由得



式代入和式得



其中



将式代入与式得电力系统线性化模型





其中



**规模化新能源基地的动态仿真**

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，本文开发了一种基于MATLAB/Simulink的新一代电力系统动态仿真程序。该仿真程序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，下文将详细阐述该程序仿真建模核心思路。该程序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。

其中，时域非线性仿真法将电力系统各元件模型根据元件间拓扑关系形成全系统模型，然后以稳态工况或潮流结果为初值，求解扰动后的数值，即逐步求得系统状态量和代数量的变化情况，从而分析系统的稳定情况。该方法可以在计及系统非线性的情况下，得到某些特定扰动时系统变量完整的时域响应。但是该方法也存在一些缺陷，如对大型系统的仿真时间较长，不能保证所有关键模式均被激发，难以通过仿真结果直接找出系统不稳定的本质原因，所以该方法主要用于校验结果。

无论是特征模式分析法还是时域仿真法，它们共同的基础都是全系统的小信号模型。因此，建立全系统的小信号模型对于分析系统的小干扰稳定性是基础性的工作。

仿真程序设计思想与仿真流程

近年来，MATLAB以其强大的矩阵计算能力和多样的集成工具箱，成为电力系统研究人员的主要仿真工具之一。除了集成在Simulink中的Sim power system工具箱外，也有相当多的开源工具箱被开发用于电力系统研究，如电力系统工具箱(power system tool，PST)，电力系统分析工具箱(power system analysis tool，PSAT)，MatDyn等。Sim power system工具箱适于小规模的电磁暂态仿真，对较长时间动态进行仿真时，仿真缓慢。PST由纯代码构成，添加元件的逻辑复杂。作为改进，PSAT采用图形化界面，能更直观的构建系统。但PSAT的多功能和封装使代码难以理解和修改，缺乏灵活性。MatDyn，该软件的代码更简单，编程更灵活，便于使用者理解学习，但仍由M语言构成，且缺乏如小信号分析等功能。这些开源软件相比商业软件的灵活性更强，但使用门槛高：缺少求解算法，难以应对复杂系统仿真需求；使用编程建模，需要与各种求解器交互，难以分模块测试，对使用者的编程和数学能力提出较高要求；同时，由于这些软件已发布较长时间，部分功能无法在新版MATLAB使用；难以结合如增强学习，神经网络等先进算法；也缺少如柔直网络，风机等研究所需模型。使用上述工具箱对大规模新能源系统建模研究时，耗时耗力，调试困难。仿真对比测试的模型包括：线性化状态空间模型、非线性解析模型和详细电磁暂态模型。其中，线性化状态空间模型可以通过本文提出的模块式线性化建模方法得到；非线性解析模型即对系统各环节动态方程线性化操作前的系统模型。

综上，利用前节构建的新能源系统模型，可以方便的进行数值仿真程序的编制。建立了含机电暂态同步机、电磁暂态同步机、双馈感应风力发电机、永磁直驱同步发电机、光伏模块、储能模块、传统直流系统模块、柔性直流系统(MMC)模块等模型；并且处理了交流网络和直流网络的模型，使之能更方便的扩充至多个交直流网络混联的结构。

工具箱内的数据流向与执行顺序如图5-1和图5-2所示，可分为初始化和动态仿真两大部分。在初始化时，利用牛顿拉夫逊方法进行交流潮流计算，利用交替迭代法进行潮流计算，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，在参数文当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，如风机控制环节的控制参数等。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各设备模型中，完成初始化。



图5-1所提动态仿真程序数据结构与运行流程

工具箱通用整体建模结构如图5-2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，可列出全系统暂态方程的一般形式：



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5-1本文所开发仿真程序与现有主流工具箱功能对比

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **工具箱** | | **时域** | | | **线性化** | | | **综合难度** | | |
| **种类** | **查看输出** | | **线性化工具** | **可得状态矩阵A** | | **自定义模型**  **线性化难度** | **包含新能源元件种类** | | **扩展性** | **代码复杂度** |
| **MatDyn** | 编程 | | × | × | | × | 一般 | | 困难 | 中等 |
| **PSAT** | 部分编程 | | √ | × | | 中等 | 较少 | | 困难 | 复杂 |
| **PST** | 编程 | | √ | √ | | 困难 | 一般 | | 困难 | 复杂 |
| **本文** | 可简单编程 | | √ | √ | | 简单 | 较多 | | 简单 | 简单 |

图示

描述已自动生成

图5‑2所提动态仿真程序内模型通用逻辑结构