

ABSTRACT

Vigorous development of distributed generation techniques, especially extensive application of new energy generation techniques, has brought modern power system into a brand new era. Due to the unique dynamic characteristics of the distributed generation sources, grid-connection techniques, and three phase unbalanced network structure, dynamic features of power system have been greatly influenced by the high permeability of distributed energy sources connected to the transmission and distribution grid. This is quite different from traditional bulk power system operation mode,. In this thesis, the main work focuses on the modeling and programming of stability simulation of distributed power generation system. The major achievements are as follows:

In the field of modeling techniques, the commonly used typical quasi-steady-state models and control link structures of power electronic devices are summarized in this thesis. A general quasi-steady-state modeling design method is proposed and applied in distributed generation system modeling. The proposed method and model are much beneficial to normalize modeling expression forms of distributed generation system.

In the aspect of numerical algorithms, a stability simulation algorithm suitable for distributed generation system is presented in this thesis. In the proposed algorithm, a predict - correction alternate solving implicit integration algorithm is combined with, a numerical differential method to obtain the system Jacobian matrix. With this algorithm, no analytic information of Jacobian matrix elements is required in advance. The Jacobian matrix is acquired directly by numerical calculation based on the original system state equations and algebraic equations. Moreover, this method can automatically take into account the impact of system model structure mutation. Considering the existence of large amounts of discontinuous control links in distributed generation system, this feature makes the proposed method especially advantageous for the development of stability simulation programs for distributed generation system.

For the software design and development, a new mesh list data structure is presented based on the sparse storage structure of cross-linked list. The application of this structure can realize highly efficient sparse data storage for DAE system Jacobian during simulation. A Mesh List-Double Layer Algorithm (MLDLA) is developed on the basis of this data structure. The outer layer is designed for explicit integration

method, whereas the inner layer is designed for implicit integration method. The consolidated implementation of explicit and implicit integration algorithms is achieved by the double layer structure. For inner layer implicit integration algorithm, the application of mesh list enables a flexible and efficient processing of interface between dynamic components and control devices, as well as the interface between differential equations and algebraic equations of the DAE system. The DAE system block Jacobian matrix can be assembled arbitrarily based on modularized design. This provides a convenient solution for the addition and update of new components and new models.


Furthermore, the system object-oriented design and analysis method is investigated in this thesis to carry out stability simulation of distributed generation system. The double-layer AC-DC bus-tree structure for grouping elements in distributed generation system is presented to describe grid-connection system. The interface of double-layer AC-DC bus-tree is similar to generator and its control unit in traditional power grid. It has “plug and play” feature. In the following part, design methods for modeling class and functional class are illustrated, as well as structure and function of major classes.

In the end, simulation results for test cases are given to validate the correctness of the modeling and algorithm for stability simulation of distributed generation system.

KEY WORDS: Distributed generation system, stability simulation, General quasi-steady-state model, Numerical differential method, Mesh list-double layer algorithm, Double-layer AC-DC bus-tree structure

独创性声明


本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

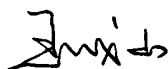
学位论文作者签名:  签字日期: 2009 年 09 月 05 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 

导师签名: 

签字日期: 2009 年 09 月 05 日

签字日期: 2009 年 9 月 5 日

第一章 绪 论

1.1 课题研究目的和意义

采用分布式发电供能技术，有助于充分利用各地丰富的清洁和可再生能源，向用户提供“绿色电力”，是实现我国“节能减排”目标的重要举措。我国颁布的《可再生能源法》、《可再生能源中长期发展规划》中都已明确将分布式发电供能技术列入重点发展与支持领域，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》^[1]中明确提出要大力开展“可再生能源低成本规模化开发利用”以及“间歇式电源并网及输配技术”，开展分布式发电供能技术方面的研究工作符合国家重大需求。

分布式能源发电系统又简称为分布式发电系统，它一般指发电功率在几KW至 50MW的小型模块化、分散式、布置在用户附近为用户供电的发电系统。近年来，应用较多的分布式发电技术主要有微型燃气轮机、燃料电池、光伏发电、风力发电、生物质能发电等^[2]。分布式能源发电系统通过将各种不同的能源形式转换为电能加以利用，是分布式能源最有效的利用方式之一。分布式发电系统不仅向用户提供所需的电能，同时还向用户提供热能，满足用户供热和制冷的需要，具有能源利用效率高、供能可靠性高、污染物排放少、经济性好等优点。在满足用户供热和制冷需求的前提下，电能作为统一的能源形式将各种分布式能源加以融合。

在大电网崩溃和意外灾害（例如地震、暴风雪、人为破坏、战争）出现时，分布式发电系统可以采用微网形式独立运行，以保证重要用户供电不间断，并为大电网崩溃后的快速恢复提供电源支持。微网是指由分布式电源、储能装置、能量变换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统，是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统，既可以与大电网并网运行，也可以孤立运行。

分布式发电技术的蓬勃发展特别是各种新能源发电技术的广泛应用使得现代电力系统进入了一个崭新的时代。与传统的集中式发电不同，分布式发电系统在运行时不仅要考虑电负荷的需求，有时还要受冷、热负荷的约束，并且一些分布式电源的出力往往还要受外部条件的限制；由于分布式电源自身具有的惯性较小，在系统内部和外部电网发生的各种故障或操作都会使系统的运行状态发生剧

烈的变化,这些扰动还可能会导致系统运行方式的改变;另外,在分布式发电系统的各个层面还配置了大量的不同功能、不同特性的控制与保护装置,它们或者调整分布式电源的有功出力达到最大,或者调整分布式电源并网的电压、频率与无功功率,或者在故障期间对分布式电源进行隔离从而起到保护作用;为了最大限度地提高能源利用效率,通常将具有不同特性相互补充的两种或多种分布式电源以微网的形式组合起来并列运行。因此,整个系统的运行点会随着冷热电负荷需求的增减、电源出力的变化、运行方式的改变、系统中各种故障的发生以及控制与保护装置的调节作用而不断地发生变化,其动态过程相对于传统电力系统而言也更为复杂,在这些情况下仅仅依靠稳态分析的方法是不够的。

采用仿真技术研究系统的稳态和动态行为是电力系统研究中最常用的方法,也将是分布式发电供能系统以及微网系统相关领域的重要研究手段。鉴于微网的复杂性,无论是研究其与大电网相互作用的机理,还是研究在各种扰动下的复杂动态行为;无论是研究其保护与控制问题,还是研究其规划设计问题,都需要强有力的仿真工具作为基础,同时需要构建兼容微网分析仿真实验平台。作为分布式发电系统研究的主要手段,数字仿真技术对于提高分布式发电系统的运行经济性和可靠性,解决分布式发电系统并网运行以及能源的综合高效利用所涉及的理论和技术问题,提供了必要的工具,对促进分布式发电系统示范工程建设以及分布式发电技术的推广应用具有重要的理论意义和实用价值。

1.2 分布式发电系统稳定性建模特征

在分布式发电供能系统中,既有同步发电机等具有较大时间常数的旋转设备,也有响应快速的电力电子装置。在系统发生扰动时,既有在微秒级快速变化的电磁暂态过程,也有毫秒级变化的机电暂态过程和以秒级变化的慢动态过程。综合考虑它们之间的相互影响,实现动态全过程的数字仿真是一项极具挑战性的研究课题^[3]。图 1-2 给出了各种分布式电源的动态行为的时间尺度。

需要指出的是,传统的配电系统不存在同步稳定性问题(但是有电压稳定性问题),少量的小容量DG对电网的影响也可以忽略,但是大量的分布式电源接入到输配电网络中并网运行时会对电力系统的动态特性产生显著影响^{[4][5]},因此,需详细研究高渗透率水平下,各种DG技术、网络结构和运行方式对系统功角稳定性、电压稳定性及频率稳定性的影响^{[6][7][8]}。另外,分布式发电系统中广泛使用的光伏发电、燃料电池等静止型电源具有很小的惯性时间常数,减少了系统中的旋转储能,在系统发生大扰动时需要和储能设备配合提供有效的功率支撑,和传统以旋转电机为主体的能量交换方式有本质区别。对于以上问题的研究都离不开

开分布式发电系统的稳定性分析计算。

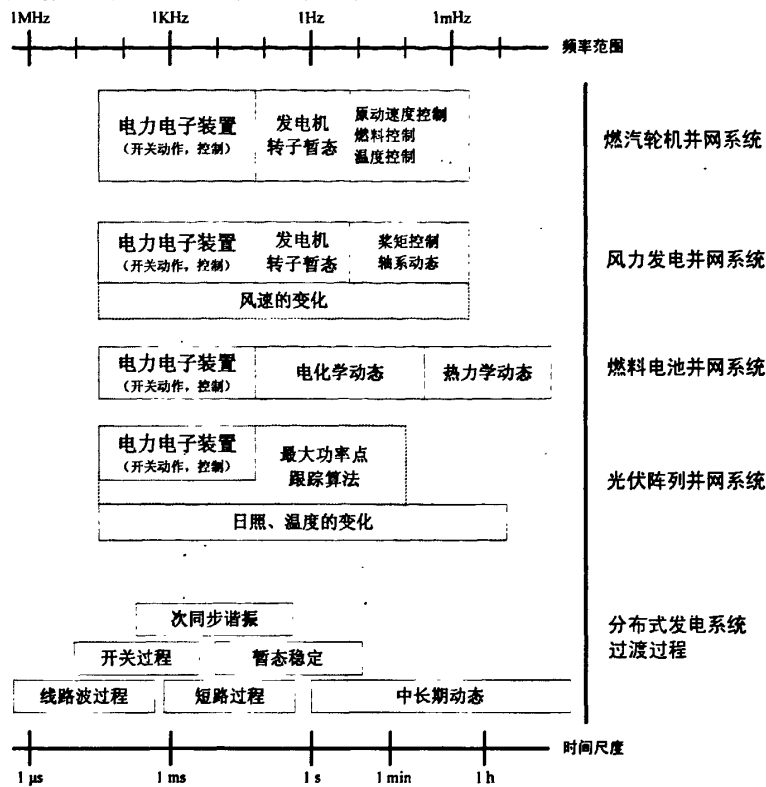


图 1-1 分布式发电并网系统各种动态行为的时间尺度

分布式发电供能系统为电力系统时域仿真技术赋予了全新的含义，也同样带来了新的研究挑战：

例如，分布式发电系统中电源具有多样性的特点，既有类似燃料电池发电系统、光伏发电系统这样的静止型发电设备，也存在像风力发电系统、微型燃气轮机发电系统这样的旋转型发电设备。既涉及到化石燃料、天然气等热电转化过程，又涉及热能制冷过程、此外还涉及到各种冷、热、电能量在电网、电源以及其他系统中的储存过程。这种含有大量非同性元件的建模过程需要考虑与电力传输有关的电气量特性，如交流电机磁链动态、电力电子设备开关控制、电力网络 KCL、KVL 定律约束等；还需要兼顾到其他形式的一次能源如化学能、热能、光能等非电气量特性，如燃料电池内部的电化学过程、光伏电池内部光电效应、风力发电系统的空气动力学机理等。既要考虑到常规输电系统、配电系统特点、供热(冷)系统模型，还要考虑各种能源转换装置的模型。对于某一具体物理装置或者元件，针对不同问题研究领域可能采用完全不同的数学模型。如何针对这些具有显著差异的非同性系统，以及不同的研究目的建立准确而合理的数学模型是分布式发电系统研究亟待解决的重要问题之一。

在分布式发电系统中,具有通用化元件建模也存在很多问题需要进一步研究,例如大多数的分布式电源和储能元件是通过电力电子装置接入到电网之中,各种电力电子装置的控制目标虽然有所不同,但是其主要的结构和控制方法仍然具有一定的规律可寻,如何总结相应的规律性并提炼出模块化特征明显的通用电力电子装置的模型,对于降低分布式发电系统建模复杂度无疑是一件重要而有意义的工作。为此,大量研究人员提出了多种通用化的电力电子器件硬件和软件设计方案,美国海军研究机构(ONR)^[9]基于电力电子集成电路理论提出一种电力电子积木技术(Power Electronic Building Block-PEBB),使电力电子器件的集成达到一个很高的水平。随后出现了电力电子器件组集成了更多的电路、控制、传感器和激励标准的器件和模块^[10]。美国国家能源实验室(NERL)开发了一种用于DER系统的高级电力电子接口(Advanced Power Electronics Interfaces—APEI)^[11],在PEBB以及DSP控制技术的基础之上,加入辅助信号、控制模块,构成了针对分布式发电系统适用性更强的电力电子集成模块。这些研究成果表明硬件高速发展,为数字化仿真计算中通用化模型建模的实现提供了物理依据。

此外,分布式电源根据其容量和电压等级的要求,可能接入输电系统或者高压配电系统,例如大容量风力发电机组并联,以风电场的形式接入高压电网;也可能接入中低压配电系统,如小容量(几百 KW)的微型燃汽轮机发电系统、燃料电池发电系统、小容量风力发电机组、光伏发电设备等。一种比较普遍的方式是:在较低电压等级上就近满足当地负荷的需求,然后若干个小型微网组成更大范围的微网,接入更高电压等级的网络。分布式电源可以是单相的,也可能是两相或三相的形式。这种独特的系统结构对分布式发电供能系统网络拓扑的建模能力提出了更高的要求,传统输电系统拓扑结构的描述方法显然不再是完备的,新的仿真技术需要拥有更加准确和完整的配电系统建模能力。

1.3 分布式发电系统稳定性仿真的基本方法

电力系统暂态稳定数值仿真的研究内容是通过数值计算模拟出电力系统状态对某种扰动作用的反应。电力系统数字仿真的工作可分为建立数学模型和数学模型求解两大模块^[12]。建模的过程是根据系统仿真时间尺度范围,由物理原型抽象出数学模型。传统电力系统暂态稳定性仿真中的数学模型包括两大部分:

- 1) 描述设备动态特征的微分方程
- 2) 描述设备之间电气联系的代数方程

动态设备之间的电气连接关系在运行中可能改变,如负荷的投切、机组的启停、线路开断和重合闸等操作,如果计及继电保护装置,还包含大量连续和(或)离散

的逻辑时变参数；一般可将电力系统数学模型用高维非线性、非自治的分时段微分-代数方程组来描述。数学模型求解是采用一定的数值方法和软件技术来设计仿真程序。暂态稳定仿真问题在数学上可归结为对一组微分代数方程初值问题的求解：

$$\left. \begin{aligned} F = f(x, y, u) - \dot{x} &= 0 \\ g(x, y, u) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式(1-1)中的微分方程描述了电力系统中交流电机、柔性交流输电系统、发电机组控制器动态特性， x 为动态元件的状态变量， y 为代数变量，一般为以复数形式或者实虚部展开形式的电压、电流相量； u 为输入。在给定状态变量、代数变量初值之后，采用某种稳定数值算法求解这组微分代数方程组在每一个时步上的数值解来代替真值，即可得到状态变量和代数变量的时域解，且解是唯一的。

1) 常用数值计算方法概述

求解微分方程的数值积分方法很多，主要实用的数值仿真算法分为三类：(1)单步法，如欧拉(Euler)法与改进欧拉法、龙格-库塔(Runge—Kutta)法、隐式梯形算法等（交替求解或者联立求解形式）；(2)线性多步法，如哈明(Hamming)算法，阿达姆斯(Adams)算法；(3)针对病态(stiff)方程的 Gear 法、向后差分法(BDF)、隐式及半隐式龙格—库塔法等。单步法的优点是可以自起步，即由稳态值出发，用通用公式一步步求取数值解，而多步法则不能自起步，因而需要多于一步的状态信息。对电力系统这样的中度刚性系统而言，最常用的工程计算方法为四阶显式龙格-库塔法，以及具有二阶精度且 A 稳定的梯形法。

对于代数方程组的求解方法主要采用适于求解非线性代数方程组的牛顿法。这里代数方程组除了指网络方程之外，也包括采用隐式化方法之后微分方程差分化和网络方程联立的代数方程组。

龙格-库塔(Runge-Kutta)法(简称为R-K方法)是一类高精度的单步法，是稳定性计算中最早应用的数值计算方法之一，其中四阶显式R-K法非常适合于DAE方程的交替求解，为了消除交接误差带来的影响，网络代数方程 g 可以参与差分方程的循环计算，以提供和状态变量对应的代数变量值。其他的显式计算方法，如欧拉、改进欧拉，二阶，三阶显式R-K法均可采用这种方式消除交接误差的影响^[13]。

单纯从求解系统的角度来看，联立求解和交替求解法各有利弊，都曾被国内外许多暂态稳定程序所应用。采用联立求解方法的有美国EPRI开发的ETMSP^[14]、比利时TRACTEBEL和法国EDF共同开发的EUROSTAG^[15]、ABB公司开发的SIMPOW程序^{[16][17]}，采用交替求解方法的有美国通用电气和日本东京电力公司共同开发的EXSTAB^{[18][19]}、美国Bonneville Power Administration开发的BPA 暂态

稳定程序^[20]、美国Power Technologies Inc. 开发的PSS/E^[21]、清华调度员培训仿真系统(THDTS)^[22]等等。同时考虑到多时间尺度上的系统动态仿真问题,也发展出了各种变步长的隐式积分算法^{[23][24]}。以下主要介绍其基本原理。

基于预测—校正形式的联立求解法^{[25][26]}(Simultaneous solution)是常用的一种计算形式,校正过程中将微分方程的差分方程和代数方程联立形成一组非线性代数方程。预测方法的好坏直接影响校正步的收敛特性,代数变量的预测选择性较大,有线性几何预测、平方几何预测等,预测性能好坏对收敛性起到关键的作用,校正部分决定算法的稳定性^[13]。

在每一次迭代中,雅可比矩阵方程的部分元素都会更新,故常规的作法是在每一次迭代中重新进行LU分解,这样的做法较费机时。为了减少计算量,人们采用伪牛顿法^{[27][28]}(very dishonest Newton method,缩写为VDNM,或称常系数Jacobian迭代法),在多次迭代或时步中采用同样的雅可比矩阵LU分解结果进行计算。隐式积分联立求解具有较好的数值稳定性。其算法不引入微分方程和代数方程的交接误差,能够适应较长过程的稳定计算。但是在程序设计上较为复杂,而且需要建立联立求解的修正方程,导致程序的可扩展性和灵活性不足。

联立求解非线性方程若采用伪牛顿法,在每步或几步仿真计算中只分解一次雅可比矩阵,但迭代次数会略有增加^[27]。文献[29]提出采用奇异摄动技术进行电力系统动态仿真,每步计算只要求对联立矩阵中的网络方程对应部分三角分解一次,而不是对整个系统方程,因此提高了仿真计算速度。

交替求解法(Alternating Solution)是在一个时间步长上采用某种积分方法对微分方程进行求解^{[27][30]},同时在每个时间步长上对代数方程进行求解,两个求解过程是分别进行的,在总的求解过程中,存在着网络代数方程组和微分方程组之间迭代的过程。原则上可以彼此独立地选择不同的方法交替求解系统的微分方程和网络代数方程,一般选择比较简单的简单迭代法^[13]计算差分部分,代数部分一般采用牛顿法迭代求解。在每一时步开始阶段也可以加入初值预测环节,以加快交替求解过程的收敛过程。

在交替求解法中,网络方程和动态元件方程之间有明确的接口,动态模型的修改和增加并不影响网络方程的求解速度,其计算精度由迭代来保证;而且还可以根据物理关系将动态方程分成若干层次,模型的修改和增加最终只影响动态方程中的相关部分,程序的开发和维护比较简单。该方法的缺点存在微分和代数方程的交接误差,当系统的网络结构发生突变时(例如开关操作),网络的某些非状态变量(如电压、电流)将发生突变。突变后的状态变量如果采用突变前的值代替的话,会引入误差,甚至由此产生数值振荡。

为了改善交替求解算法计算性能,文献[31]提出了一种新的交替迭代解法,

针对联立求解微分方程离散化后的差分方程与网络的代数方程,引入两个加快收敛的矩阵,并推导出它们的最优值。仿真结果表明,该方法比已有的交替迭代解法具有更好的收敛性。

交替求解算法中当计及发电机凸极效应时,网络方程的导纳矩阵是发电机功角的函数,需要实时进行更新,从而增加了算法执行时间。Dandeno和Kundur等人在文献 [32]中提出了一种忽略发电机凸极效应的近似非迭代算法,提高了计算速度同时也带来了较大误差。Moon等人在文献 [33][34][35]中提出了一种分析极化线性网络的方法,它是一种充分考虑了发电机凸极效应的非迭代算法。Moon等人还在文献 [36]中提出了一种基于极化线性网络理论的极化系统分解技术。与传统方法相比,非迭代算法和极化分解技术都能显著地减少计算时间,但是运算矩阵变化比较复杂,对于编程技术的要求比较高。

文献 [37]在忽略发电机暂态凸极效应的经典模型条件下提出了采用高阶Taylor级数法进行快速暂态稳定计算的方法,计算误差比较大。文献 [38]提出双向模块简化技术,以系统模块分解概念为基础,对线性增量方程作初等线性变换,将微分部分与代数方程交替求解,减少新增模型的加入难度、以及暂稳仿真计算量。

2) 暂态稳定性算法中网络三相不对称性的考虑

输电系统网络参数一般视为对称,采用 $xy0$ 同步坐标系下正序电网模型,在正序电网中仅能够处理对称横向、纵向故障。而在实际输电系统或者配电系统中存在大量三相不对称的情况。引起不对称的因素很多,如电力变压器、移相器、不换相的输电线路等运行元件的参数不对称,因故障而引发的非全相运行等^[38]。对于以上不对称情况,需要采用可以考虑不对称性的暂态稳定性算法进行仿真求解。目前常用的仿真算法主要分为基于012坐标系^[28]和基于abc坐标系^[40]两种方式。

如果网络元件对称,但是故障不对称,可以采用对称分量法^[41]将系统相序分离之后采用012坐标系来描述网络结构和不对称故障。

如果网络参数不对称,则不对称元件在序分量空间不能解耦,处理故障的序网变换不再成立,需要采用abc坐标系来描述网络元件和故障操作^[42]。分布式发电系统多接于配电侧,包括电源、网络和负荷在内的各种环节都可能存在较大的不对称性,因此采用该方法是比较适合的。

不对称暂态稳定性算法最大的特点就是处理不对称问题。文献 [43]以矩阵的形式对故障模型和算法进行了总结,论述了对任意复杂多重故障的故障电流计算采用统一的数学描述和规范的求解方法,并指出了利用相分量法和对称分量法相结合解决不对称故障计算的方法。文献 [38][44]提出将网路中对称部分和不

对称部分进行分离, 对称部分采用序分量法 (symmetrical components method-SCM) 表示, 而不对称部分采用相分量法 (phase components method-PCM) 表示, 两者采用矩阵变换相结合。这些处理方法比较适合于输电系统, 是一种扩展故障分析方法。文献 [45] 在不增加网络节点的情况下, 把网络中相应元件的导纳用相分量特征导纳代替, 用于故障计算。文献 [46] 基于相分量法, 建立了横向、纵向故障接口电路的通用相分量模型, 推导了三相元件与平行线路的相分量阻抗矩阵。文献 [47] 推导了跨线接地和不接地故障的通用相分量模型。文献 [48] 推导了同杆双回线断相故障相分量模型。

由于不对称问题突出, 动态元件和网络的机网接口也需要修正。在不平衡电网中, 旋转电机一般采用所谓的三相 $[Y_{bus}]$ 导纳矩阵和网络接口, $[Y_{bus}]$ 是采用动态元件的序分量构成, 再通过对称分量变换和三相网络进行接口。文献 [49][50] 给出了在不平衡网络、不对称故障情况下, 同步发电机和异步电动机的 $[Y_{bus}]$ 建模方法。文献 [51] 提出了一种新的异步电动机模型, 该模型与三相网络接口的 $[Y_{bus}]$ 中不显式含有滑差, 因此在每一时步计算过程中全系统节点导纳矩阵不需要随滑差更新, 降低了网络的非线性程度, 加快了仿真计算时间。文献 [52] 讨论采用相分量模拟的不对称故障和文献 [51] 提出的异步电机模型在不对称暂态稳定性仿真的使用情况, 仿真结果表明某种情况下忽略不平衡因素会造成较大仿真误差。文献 [53] 讨论了在不平衡配电系统中对开断电容器和并联型故障的模拟方法。文献 [40][54] 基于以上提出的 $[Y_{bus}]$ 导纳矩阵动态元件模型、以及相坐标系下元件模型和故障模拟方式, 给出了大规模不平衡配电系统暂态稳定性仿真算法的一般流程, 采用是显式交替求解数值计算方法。

3) 分布式发电系统稳定性算法概述

分布式发电系统稳定性仿真计算关注的重点是系统的慢动态过程, 由于忽略电网内部快速电磁暂态过程, 因此网络元件采用准稳态模型进行描述^[55], 同时对电力电子器件忽略开关动态过程, 采用准稳态模型描述^[56]。对于分布式发电系统稳定性建模与仿真, 目前主要针对以下两种情况进行研究:

第一种情况, 分布式电源设备采用交流电机直接并入电网的稳定性仿真计算研究^{[4][5][6]}, 以燃气轮机和风力发电系统最为普遍, 这种稳定性仿真算法中动态元件的建模和网络的建模方法和原有输电系统暂态稳定性算法没有本质的区别, 主要是网络电压等级和拓扑结构有所不同, 比较适合于中高压配电系统接入分布式电源的稳定性仿真研究。

第二种情况, 分布式电源或者储能装置接入低压配电系统的稳定性仿真研究^{[7][8]}。这种情况下, 分布式电源和储能装置一般采用电力电子设备并入配电网络, 电力电子设备的使用减少了系统中的旋转储能, 同时光伏发电、燃料电池等静止

型电源具有很小的惯性,在系统发生大扰动时无法提供有效的功率支撑,需要配合储能元件共同维持系统的全局稳定性。在分布式发电系统中,储能系统主要有三方面作用:(1)尽可能使分布式电源运行在一个比较稳定的输出水平,对系统起稳定作用;(2)对于太阳能和风能这样的可再生能源,由于其固有的间歇性,相关发电系统的输出随时变化,甚至可能停止发电。此时,储能系统可起到过渡作用,保持对负荷的正常供电;(3)能够使不可调度的分布式发电系统作为可调度机组并网运行^[57]。这与传统大电网主要依靠发电机和电动机的旋转备用储能来维持系统稳定性的方式截然不同。文献[7]探讨了电力电子设备接入之后系统的“零惯性”特征,以及电力电子装置与分布式电源、电网之间的交互影响过程。文献[8][55]着重探讨了逆变器主导型低压微网(Inverter Dominated Unbalanced LV Microgrids)稳定性算法,“逆变器主导”的含义是指网络的主导动态过程由逆变器的控制系统决定,在这种情况下可以将逆变器视为一种特殊的发电机,其系统稳定性主要由并网逆变器的控制策略决定,如恒功率控制^[56]、恒频恒压控制^[58]、下垂控制^[58]等,由于仅仅对逆变器动态进行建模,系统刚性程度不高,因此文中采用显式交替求解算法进行仿真求解,若考虑将稳定性仿真算法扩展到分布式电源或者储能装置的动态建模,需要采用数值稳定性更高的数值计算方法。

分布式发电系统结构特殊性导致了其稳定性计算方法需要解决新的问题,分布式发电系统网络模型的复杂性导致了动态元件和网络接口方法更加复杂,如果采用隐式算法,DAE系统的联立方程对应迭代雅克比矩阵求取异常困难。当所涉及的模型或函数具备较强的变结构或变参数特征时,将使仿真系统的开发工作大大复杂化。为了解决雅克比矩阵求解问题,众多学者提出了很多新方法,例如文献[59]采用自动微分法,可以直接给出函数对各变量的导数值,计算效率较高,但要求原函数能够分解为初等函数以及初等运算,当被仿真的系统结构发生显著变化时,形成雅克比矩阵的计算量大为增加;文献[60][61]提出了利用Krylov子空间方法中的通用最小留数法—GMRES方法研究电力系统暂态稳定性仿真算法中的线性方程组迭代求解问题,实质上是采用一种不精确牛顿法计算线性方程组的解,不需要显式求解系统的Jacobian矩阵,而是采用有限差分的方式实现Jacobian矩阵和向量乘积计算,但是对于矩阵需要进行预处理,才能提高迭代的收敛性能。此外在小扰动稳定性分析中,可以采用数值微分法求取雅克比矩阵[62]。

1.4 分布式发电系统稳定性仿真软件开发

针对于分布式发电系统不同的时间尺度下的模型,需要采用不同的计算工具进行仿真研究。目前国内外主要采用的是以电磁暂态为主的仿真工具,如EMTP^[63], EMTP-RV、ATP、PSCAD、MicroTran和Matlab/SimPowerSystems等离线电磁暂态仿真软件,分析扰动前后分布式电源与网络中其它元件在故障或操作过程中及其后详细的快速动态响应特性。

随着时间快速衰减,快速变化过程消失后,在更长的时间框架中机械传动过程、热力学动态以及化学和电化学反应这些较大时间常数的动态过程逐渐成为系统稳定性的主导因素^[58]。考虑到网络规模、电磁暂态仿真计算速度等因素^[64],采用稳定性仿真程序分析这些慢动态过程是合适的选择。

传统的PSS/E^[65], BPA^[20]等机电暂态分析软件已经内置了典型风力发电系统、以及燃汽轮机的原动调速装置的部分模型,DIgSILENT^[66]计算分析软件提供了相对比较完整的电力电子装置控制系统模型,但是这些软件对分布式电源建模仍然是以用户自定义方法为主,比较适合对于传统输电系统大容量发电机组、大型风电场建模研究。考虑到分布式发电系统电压等级、接入容量的限制,微网控制策略的特殊性,以及电源本身、电力电子装置控制系统的特点,以上提到的这些传统软件并不十分适合于分布式电源稳定性仿真计算研究。

稀疏存储技术被广泛用于软件的开发过程以解决计算规模和计算效率的问题^[67];但是大多数商业软件如BPA、PSS/E中对于稀疏矩阵的处理是基于FORTRAN索引数组的方式来实现的^[65],这种方式可能会遇到索引数组维数上限不足的问题,并且这种稀疏矩阵存储技术编程复杂,会导致元件算法内部的数据结构设计过程、或者增加新元件和模型过程实现困难,不易进行面向对象系统开发。文献[68]介绍了面向对象技术构建稀疏矩阵和向量类,实现单向链表操作;文献[69]给出了稀疏矩阵向量计算方法,用于前推回代过程;文献[70]中给出了稀疏矩阵静态联结链表(static linked list)的面向对象设计方法,可以视为十字链表存储的雏形。这些方法所采用的稀疏存储结构和访问方式从数组操作逐渐过渡到了链表指针的操作,值得提出的是基于单维链表形式的稀疏矩阵存储技术已逐渐应用到无功优化、静态安全分析领域^{[71][72][73]}。文献[74]提出了所谓二维稀疏矩阵结构,将二维稀疏存储转换为单维链表来表示,但是没有实现真正意义上的十字链表稀疏结构的行列双向检索功能。文献[75]总结前人的经验,发展了一种采用辅助数组的十字链表结构,提高元素寻址的效率,利用电力系统的特点结合十字链表稀疏存储技术,进行了一些有益的探讨。文献[76]给出了动态十字链表的CIM表达形式,规范了设计过程。以上这些文献的主要工作集中在稳态分析领域,而

对于电力系统暂态仿真计算领域的算法设计过程很少涉及。

此外,不同类型的时域仿真数值算法开发过程是相互隔离的,不能从整体上对数值积分算法形成一个统一的设计过程、完整的数据结构和接口模式,这样也会增加设计的复杂程度,降低开发效率。由于模型的开发和时域仿真数值算法是一个紧密联系的整体,如果可以将模型的算法内部数据结构设计和数值计算方法本身的统一设计结合起来考虑,则可以大大提高软件开发的效率。

1.5 本文的主要工作

基于以上探讨,本文主要针对接入低压配电系统的分布式发电系统稳定性仿真计算进行了研究,所作的工作归纳如下:

- 1) 第二章主要从“系统级-通用化”角度,针对分布式电源和储能装置动态模型,电力电子设备准稳态模型,配电网络三相建模三个方面,阐述分布式发电系统稳定性仿真的建模方法,并给出并网元件和三相网络的接口规范化设计。针对常用电力电子装置的稳定性分析所用模型,提出了一种通用化准稳态模型的设计方法,简化了分布式发电模型的开发难度,增加了模型的模块化程度,增强了模型的复用性和可移植性。
- 2) 第三章以分布式发电系统稳定性仿真算法为主要研究内容,提出一种新的预测-校正形式的隐式交替求解算法,采用自变量扰动操作的数值微分法,计算系统的雅克比矩阵元素。这种方法的优点在于不需要事先获得雅克比矩阵元素函数的解析信息,完全在原系统状态方程和代数方程的基础上直接通过数值计算获得,可以自动计及系统模型结构突变时的影响,具有程序开发简单和可靠性高等优点。考虑到分布式发电系统中非连续控制环节的大量存在,这一特点在分布式发电系统仿真软件的开发中具有独特优势。
- 3) 第四章主要分析算法的数据结构问题,在十字链表结构基础上,发展了一种适用于分布式发电系统稳定性仿真计算的网式链表结构,并基于该结构提出了一种网式链表-双层仿真算法(Mesh List-Double Layer Algorithm-MLDLA),这种双层框架可以将显式积分算法和隐式积分算法的数据结构统一在一个双层框架中。为分布式发电系统软件开发工作中新元件、新模型的加入提供了一个简便的途径。
- 4) 第五章重点阐述分布式发电系统稳定性仿真程序设计问题,对分布式发电并网系统进行了详细的面向对象分析,并阐述了系统仿真单元层、网络连接层、系统仿真层的设计过程,提出了一种在仿真单元层使用的“交直流双层母线树”结构,并对典型分布式发电系统并网系统进行了描述。交直

流双层母线树可以将系统模型类集结于交流母线之上，和仿真单元层和网络连接层进行连接，传递动态元件的特征信息，用于系统仿真层的整体算法求解。

第二章 分布式发电系统稳定性仿真模型研究

2.1 概述

分布式电源种类繁多,控制和并网方式多样,这些都造成了仿真程序设计的困难。特别是分布式电源及其控制系统的模型还在不断发展变化中,对每一种模型发展相关的程序算法,将会给仿真系统的开发造成很多不便,不利于提高仿真程序的可靠性。本章主要从“系统级-通用化”角度阐述分布式发电系统稳定性仿真的建模方法,主要分为三个部分加以介绍:

- 1) 分布式电源和储能装置部分,阐述了微型燃汽轮机、恒频恒速风力机、光伏电池、燃料电池以及蓄电池的动态模型的数学描述。
- 2) 电力电子设备部分,阐述了在分布式发电系统常用电力电子装置准稳态模型以及控制环节构造,并提出一种电力电子装置通用化准稳态模型的设计方法,增加了所建模型模块化程度,增强了模型的复用性和可移植性。
- 3) 配电网络部分,阐述了采用相线分量混合形式的 abc 坐标系对变压器、线路、负荷等配电系统元件建模的方法,考虑网络三相不对称性突出,对各种并网元件与网络之间的接口原理进行了规范化说明。

最后将以上部分组合而成,从整体上阐述了分布式发电系统的基本构造,并给出相应的典型电力电子控制方法,所有电力电子控制模型均可采用通用化准稳态模型实现。所提出的方法和模型有助于规范化分布式发电并网运行系统的模型表达形式,为第三章稳定性仿真数值计算方法介绍奠定了仿真模型的基础。

2.2 分布式电源和储能元件的动态模型

2.2.1 微型燃汽轮机

1) 单轴结构微型燃气轮机

单轴结构微型燃气轮机独特之处在于压气机与发电机安装在同一转动轴上,根据研究目的不同,微型燃气轮机原动系统数学模型也有所不同,暂态稳定性仿真分析中目前普遍采用的是Rowen微型燃气轮机仿真模型^{[77][78][78]}。其结构图如

图 2-1 所示^[80]。模型主要由温度控制系统^{[82][83][83]}、速度控制系统^[78]、燃料系统^{[78][78][81][82]}和压缩机与涡轮系统^[78]组成。

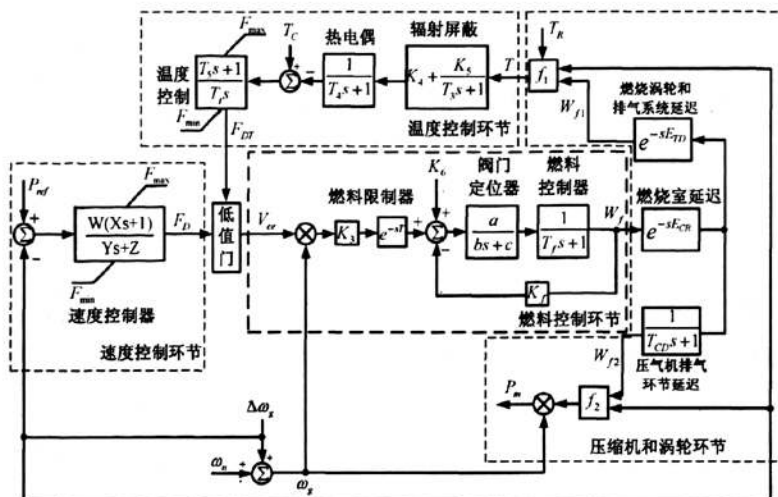


图 2-1 单轴结构微型燃气轮机原动系统传递函数框图

温度控制系统通过比较温度参考值 T_c 与热电偶测量温度，作为温度系统控制信号，并在温度调节器作用下，限制微型燃气轮机燃料输入以保护微型燃气轮机排气温度不超过限定值。

在非满载情况下，微型燃气轮机主要速度控制方式为下垂控制 ($Z=1$)^[78]，即以转子速度 ω_g 与预先设定的有功参考值 P_{ref} 之间的差值作为输入信号，以速度偏差的比例值作为输出信号，调整微型燃气轮机燃料输入，达到控制机组转速的目的。

此外，速度控制系统还包括用于机组启动的加速控制，由于加速控制主要限制启动过程中机组转速增加的斜率不超过允许值，当机组启动完毕将自动关闭，因此在分析正常工作的微型燃气轮机时，可以忽略该环节。

温度控制信号和速度控制信号均采用低值门对输入信号进行低选，用最小信号实现燃气量控制。在典型的微型燃气轮机中，一般燃料系统由阀门和执行机构组成，从燃料系统流出的燃料与执行机构和阀门的动作间具有一定的惯性。

由于微型燃气轮机燃烧室的燃烧反应时间较快，因此可以采用较小的传输延迟环节 E_{CR} 表示。压缩机-涡轮是微型燃气轮机的动力环节，压缩机释放体积的滞后时间用 T_{TD} 表示，而燃料从燃烧室到燃气涡轮的传送时间，可以用 E_{TD} 表示。

燃料燃烧产生的热能为燃气涡轮旋转提供机械转矩的同时升高了排气口的温度，其转矩值和排气口温度值分别用不同的函数计算得到。温度函数 f_1 、转矩输出函数 f_2 分别为：

$$\begin{cases} f_1 = T_R - a_{f1}(1 - W_{f1}) - b_{f1} \cdot \Delta\omega_g \\ f_2 = a_{f2} + b_{f2} \cdot W_{f2} - c_{f2} \cdot \Delta\omega_g \end{cases} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 中, T_R 为燃气涡轮的额定运行温度(K), 由微型燃气轮机的类型决定; a_{f1} 、 b_{f1} 、 a_{f2} 、 b_{f2} 、 c_{f2} 为给定常数。根据转矩输出函数 f_2 及微型燃气轮机的转速 ω_g 即可得到其输出的机械功率为式 (2-2):

$$P_m = T_m \omega_g = f_2 \omega_g = (a_{f2} + b_{f2} \cdot W_{f2} - c_{f2} \cdot \Delta\omega_g) \omega_g \quad (2-2)$$

2) 分轴结构微型燃气轮机

分轴结构微型燃汽轮机与单轴结构最大不同在于系统燃气涡轮与动力涡轮分别采用不同转轴。分轴结构微型燃气轮机原动系统由压气机、燃气涡轮、动力涡轮、燃烧室、回热器等组成^[85]。对内部进行适当简化, 模型可以由速度控制环节、温度控制环节、压缩机涡轮系统三部分表示^{[85][86]}, 如图 2-2 所示。

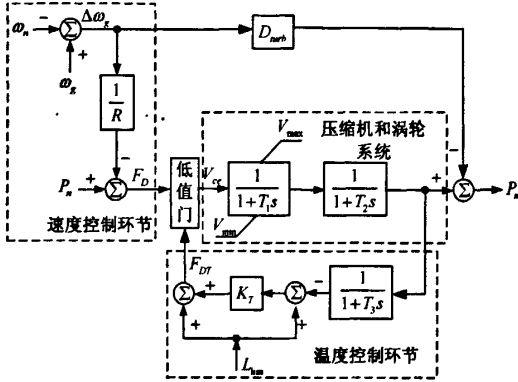


图 2-2 分轴结构微型燃气轮机传递函数框图

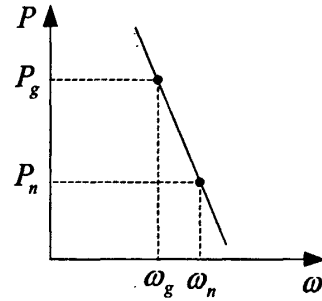


图 2-3 $P-\omega$ 下垂特性曲线

该模型对微型燃气轮机内部进行了简化, 速度控制系统采用下垂控制, 根据如图 2-3 所示 $P-\omega$ 下垂特性曲线, 调节燃机的燃料输入量 F_D , $1/R$ 为给定的下垂控制参数, $\Delta\omega_g$ 为发电机转速偏差; P_n 为微型燃气轮机输出的额定功率;

温度控制系统采用最大允许负荷限制 L_{lim} , 并采用带限幅的惯性环节表示燃气涡轮和传动装置, 去除阻尼力矩产生的功率后向发电机输出功率 P_m , D_{nrb} 为燃气轮机的转子阻尼系数。

2.2.2 风力机系统

并网型风力发电系统的分类方法有多种。按照发电机的类型划分, 可分为同步发电机型和异步发电机型两种; 按照风力机驱动发电机的方式划分, 可分为直驱式和使用增速齿轮箱驱动两种类型; 另一种更为重要的分类方法是根据风速变化时发电机转速是否变化, 将其分为恒频/恒速和恒频/变速两种。列表 2-1 如下。

表 2-1 典型风力发电并网系统

类型		风力发电系统结构
恒频/恒速 风力发电 系统	异步 发电机并 网	
	双馈 电机并 网	
	永磁 同步直 驱电机并 网	
	普通 同步/ 异步发 电机并 网	

双馈风力发电系统、永磁同步直驱风力发电系统 [87][88]一般用于大型风力发电机组并网，容量相对较大，在中低压配电系统中一般采用较少，此外也可以采用普通同步发电机或异步发电机通过变频器并网，但由于发电机转速较高，风机与发电机间需要通过齿轮箱进行啮合。

在恒频/恒速风力发电系统中，发电机直接与电网相连，在风速变化时，采用定桨距控制或者失速控制维持发电机转速恒定。一般以异步发电机直接并网的形式较为常见。无功不可控，需要电容器组或 SVC 进行无功补偿。这种类型风力发电系统的优点是结构简单、成本低，容量通常较小，在低压系统中较为常见。这也是中低压配网接入的分布式发电系统稳定性仿真中主要采用的模型。

虽然风力发电系统的并网形式有多种，但在风机本身结构上仍有不少相似之处。本文重点关注在低压配电系统采用的小容量恒频/恒速风力发电系统建模研究，对于恒频恒速风机模型，仿真子系统包括：空气动力系统模型，桨距控制模型，发电机轴系模型等。空气动力系统模型依控制方式不同而略有差别；桨距控

制模型采用主动失速变桨距控制模型；轴系模型根据系统的不同，可考虑三质块模型、两质块模型和单质块模型；

1) 空气动力系统模型

该模型用于描述将风能转化为风机功率输出的过程，其能量转换公式为：

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (2-3)$$

式(2-3)中， ρ 为空气密度(kg/m^3)， R 为风机叶片的半径(m)， v 为叶尖来风速度(m/s)， C_p 为风能转换效率，是叶尖速比 λ 和叶片桨距角 θ 的函数，表达式为：

$$C_p = f(\theta, \lambda) \quad (2-4)$$

叶尖速比 λ 定义为：

$$\lambda = \frac{\omega_w R}{v} \quad (2-5)$$

式(2-5)中， ω_w 为风机机械角速度(rad/s)。对于变桨距系统， C_p 与叶尖速比 λ 和桨距角 θ 均有关系，随着桨距角 θ 的增大， C_p 曲线整体减小。当采用变桨距变速控制时，控制系统先将桨距角置于最优值，进一步通过变速控制使叶尖速比 λ 等于最优值 λ_{opt} ，从而能够使风机在最大风能转换效率 C_p^{\max} 下运行。对于定桨距系统， C_p 只与叶尖速比 λ 有关系，桨距角为 0° 不作任何调节，因此风机只能在某一风速下运行在最优风能转换效率 C_p^{\max} ，而更多时候则运行在非最佳状态。对于恒频/恒速变桨距控制的风力发电机组，与式(2-4)对应的一种 C_p 特性曲线近似式为^[20]：

$$C_p = 0.5 \left(\frac{RC_f}{\lambda} - 0.022\theta - 2 \right) e^{-0.255 \frac{RC_f}{\lambda}} \quad (2-6)$$

式(2-6)中： C_f 为叶片设计参数，一般取1~3， R 为风机叶片半径(m)。

2) 桨距控制模型

低压配电系统一般接入恒频恒速风力发电系统，以定桨距（主动失速型）风力发电机组为主导机型。主动失速控制是指当风速在额定风速以下，控制器将桨距角置于 0° ，不做变化，可认为等同于定桨距风力发电机组，发电机的功率根据叶片的气动性能随风速的变化而变化。当风速超过额定风速时，通过桨距角控制可以防止发电机的转速和输出功率超过额定值。同时，当风速超过额定风速时，叶片失速特性导致输出功率有所下降，为了弥补这部分功率损失，控制系统动作，在一个较小的范围内调整桨距角，有助于提高风机的功率输出。在实际运行环境下，由于风速的准确测量存在一定困难，往往以发电机的电气量作为控制信号，侧面反映风速的变化情况，如发电机转速、输出功率等。图2-4给出了以发电机转速 ω_g 作为控制器输入信号实现主动失速控制的系统框图^[89]。

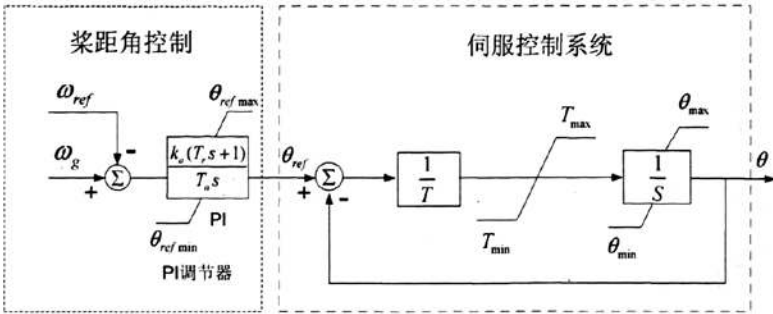


图 2-4 主动失速变桨距控制系统框图

$\theta_{ref\ max}$ 和 $\theta_{ref\ min}$ 为 PI 调节器上限和下限幅值。 $\theta_{ref\ min}$ 一般设为零,当发电机转速 ω_g 低于额定转速 ω_{ref} 时,PI 调节器输出 θ_{ref} 为零,桨距角 θ 相应的被控制在 0° ,伺服控制系统不动作。当发电机转速 ω_g 高于额定转速 ω_{ref} 时,PI 调节器的输出 θ_{ref} 大于零,伺服控制系统动作,实现桨距角的调节。 T 为伺服控制系统的比例控制常数, T_{max} 和 T_{min} 为伺服控制系统比例控制输出的上限和下限幅值; θ_{max} 和 θ_{min} 为桨距角上限和下限幅值。

3) 两质块模型轴系模型^[90]

风力发电系统的轴系一般包含有三个质块:风机质块、齿轮箱质块和发电机质块(直驱风力发电系统无齿轮箱质块)。风机质块一般惯性较大,而齿轮箱惯性较小,其主要作用是通过低速转轴和高速转轴将风机和发电机啮合在一起。由于各个质块惯性相差较大,不同风力发电系统的质块构成也不完全一致。在系统仿真过程中,三质块模型、两质块模型和单质块模型都可能会涉及。

由于齿轮箱的惯性相比风机和发电机而言较小,有时可以将齿轮箱的惯性忽略,将低速轴各量折算到高速轴上,此时的两质块轴系系统如图2-5(a)所示,传递函数为图2-5(b)^[91],

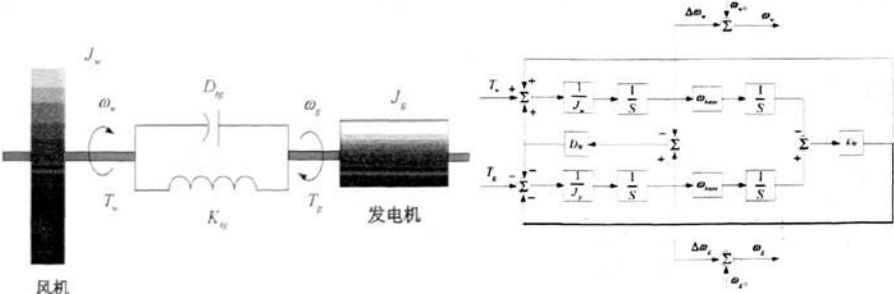


图 2-5 (a) 轴系系统两质块示意图

(b) 轴系系统两质块传递函数图

动态方程为式 (2-32) :

$$\begin{cases} T_w = J_w \frac{d\omega_w}{dt} + D_{ig}(\omega_w - \omega_g) + K_{ig}(\theta_w - \theta_g), & T_w = \frac{P_w}{\omega_w} \\ -T_g = J_g \frac{d\omega_g}{dt} + D_{ig}(\omega_g - \omega_w) + K_{ig}(\theta_g - \theta_w), & T_g = \frac{P_g}{\omega_g} \end{cases} \quad (2-7)$$

式中: T_w 为风机的转矩; J_w 为风机的惯性常数; ω_w 为风机的转速; D_{ig} 为风机、发电机轴系折算后等效阻尼系数; K_{ig} 为风机轴系、发电机轴系折算后等效刚性系数; θ_w 为风机质块转角; T_g 为发电机的机械转矩; J_g 为发电机的惯性常数; ω_g 为发电机的转速; θ_g 为发电机质块转角。

2.2.3 光伏发电并网系统

光伏电池^[92]可分为硅型光伏电池、化合物光伏电池、有机半导体光伏电池等多种。目前,硅型光伏电池应用最为广泛,本节将主要针对硅型光伏电池的建模问题进行介绍。将光伏电池串、并联可构成光伏模块,其输出电压可提高到十几至几十伏;光伏模块又可经串、并联后得到光伏阵列,进而获得更高的输出电压和更大的输出功率。光伏发电系统的实际电源一般就是指光伏阵列,它是一种直流电源。

常用光伏电池的理想等效电路如图 2-6 (a) 所示^[93],在忽略各种内部损耗情况下,由光生电流源和一个二极管并联得到。光伏电池的实际内部损耗可通过在理想模型中增加串联电阻 R_s 和并联电阻 R_{sh} 来模拟,如图 2-6 (b) 所示。在增加两个电阻的同时,图 2-6 (c) 给出的电路模型中还增加了一个二极管来模拟空间电荷的扩散效应,称为双二极管等效电路^{[94][95][96]}。双二极管等效电路能够更好的拟合多晶硅光伏电池的输出特性,并且在光辐照度较低的条件更加适用。

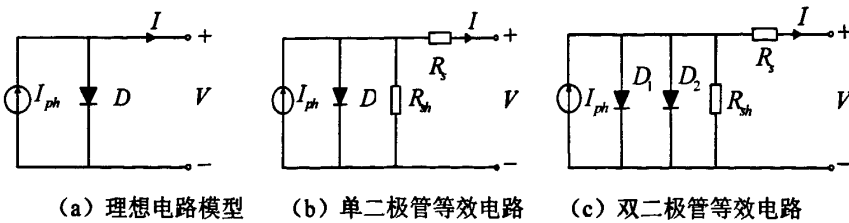


图 2-6 理想形式、考虑损耗形式的光伏电池等效电路

由双二极管模型给出的光伏电池输出伏安特性为:

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{kT}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AkT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-8)$$

当简化为单二极管模型时, 相应的伏安关系为:

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{Akt}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-9)$$

式 (2-8)、式 (2-9) 中, V 为光伏电池输出电压; I 为光伏电池输出电流; I_{ph} 为光生电流源电流; I_{s1} 为二极管扩散效应饱和电流; I_{s2} 为二极管复合效应饱和电流; I_s 为二极管饱和电流; q 为电子电量常量, 为 $1.602 \times 10^{-19}(\text{C})$; k 为玻尔兹曼常数, 为 $1.831 \times 10^{-23}(\text{J/K})$; T 为光伏电池工作绝对温度值; A 为二极管特性拟合系数, 在单二极管模型中是一个变量, 在双二极管模型中可取为 2; R_s 为光伏电池串联电阻; R_{sh} 为光伏电池并联电阻。

当光伏模块通过串、并联组成光伏阵列时, 通常认为串并联光伏模块具有相同的特征参数, 若忽略光伏电池模块间的连接电阻并假设它们具有理想的一致性, 则与单二极管等效电路图对应的光伏阵列等效电路^[97], 如图 2-7 所示。

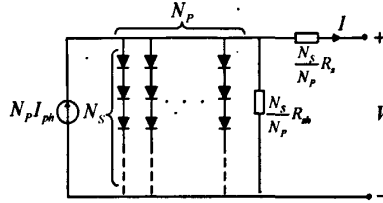


图 2-7 单二极管模型光伏阵列的等效电路

图 2-7 给出的等效电路的输出电压和电流的关系如式 (2-23) 所示。其中, N_s 和 N_p 分别为串联和并联的光伏电池数。

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(e^{\frac{q}{Akt} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)} - 1 \right) - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right) \quad (2-10)$$

若光伏电池采用双二极管等效电路, 也可以给出类似的等效电路^[94]如图 2-8 所示, 相应的输出电压和电流的关系如式 (2-11)。

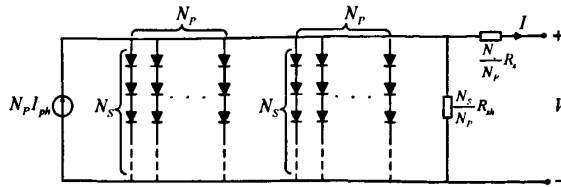


图 2-8 双二极管模型光伏阵列的等效电路

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_{s1} \left(e^{\frac{q}{kT} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)} - 1 \right) - N_p I_{s2} \left(e^{\frac{q}{Akt} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right)} - 1 \right) - \frac{N_p}{R_{sh}} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{IR_s}{N_p} \right) \quad (2-11)$$

1) 输出特性

光伏电源的输出特性与光辐照度和环境温度密切相关, 图 2-9 和图 2-10 分别给出了光辐照度和温度变化时一组光伏阵列的实际 I-V 曲线和 P-V 曲线。

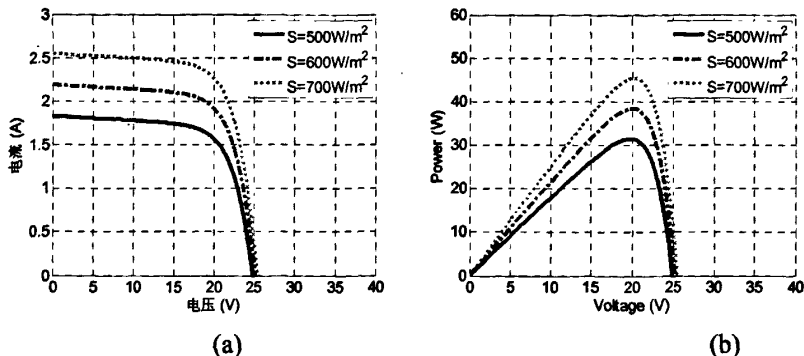


图 2-9 (a) 温度对 I-V 曲线影响

(b) 温度对 P-V 曲线影响

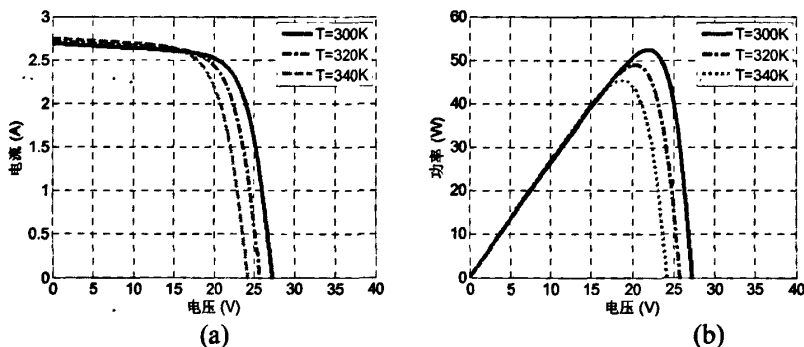


图 2-10 (a) 辐照度对 I-V 曲线影响

(b) 辐照度对 P-V 曲线影响

从图中可以看出, 随着温度的升高, 光伏电池的短路电流增大, 但开路电压却不断降低, 而且明显比电流的变化程度大, 因此在光辐照度恒定的条件下, 温度越高, 最大功率反而越小, 而且最大功率点电压变化较大。相比而言, 光辐照度的提高对于短路电流、开路电压和最大功率都是增大作用, 而且最大功率点电压变化较小, 在某些条件下可近似认为不变。

在分布式发电系统稳定性仿真中, 光伏电池 (或阵列) 的主要运行方程由式 (2-8) — (2-11) 代数方程确定。通过对光伏电池板的输出特性进行测试, 可以得到其电压/电流外特性曲线, 即 I-V 曲线, 在此基础上进行参数拟合就可以获得上述方程或电路模型中的参数值。一般来说, 厂家给出的 I-V 曲线是在 IEC 标准条件下得到的。此时, 辐照度为 1000 W/m^2 , 电池工作温度为 25°C , 即 298 K , 大气质量为 1.5。考虑到光照和温度对 I-V 曲线存在着如图 2-15 和图 2-16 所示的影响, 当实际光辐照度和温度与标准条件有差异时, 需对参数进行一些修正^[98], 以式 (2-8) 为例, 其重点修正量为光生电流 I_{ph} 和二极管饱和电流 I_s , 修正公式如下:

$$I_{ph} = \left(\frac{S}{S_{ref}} \right) \left[I_{ph, ref} + C_T (T - T_{ref}) \right] \quad (2-12)$$

$$I_s = I_{s, ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]}$$

式(2-12)中, S 为实际辐照度 (W/m^2); S_{ref} 为标准条件下辐照度, 即 1000 W/m^2 ; C_T 为温度系数, 由厂家提供 (A/K); $I_{s, ref}$ 为标况下二极管饱和电流 (A); E_g 为禁带宽度 (eV), 与光伏电池材料有关。

2) 最大功率点跟踪控制

在实际运行的光伏系统中, 应该尽量通过负载匹配使整个系统运行在最大功率点附近, 以最大限度地提高运行效率。最大功率点跟踪 (Maximum power point tracking-MPPT) 控制目的就是要根据光伏电源的伏安特性, 利用一些控制策略保证其工作在最大功率输出状态, 以最大限度地利用太阳能。目前, MPPT控制算法很多^[99], 如: 扰动观测法^[100], 增量电导法, 爬山法, 波动相关控制法, 电流扫描法, dP/dV 或 dP/dI 反馈控制法, 模糊逻辑控制法, 神经网络控制法等等。下面以扰动观测法为例, 介绍MPPT控制算法。

扰动观测法算法的原理是周期性地对光伏阵列电压施加一个小的增量, 并观测输出功率的变化方向, 进而决定下一步的控制信号。如果输出功率增加, 则继续朝着相同的方向改变工作电压, 否则朝着相反的方向改变。扰动观测算法只需要测量 V 和 I , 同增量电导法一样具有实现简单的特点。扰动观测法的算法流程图如图 2-11 所示。

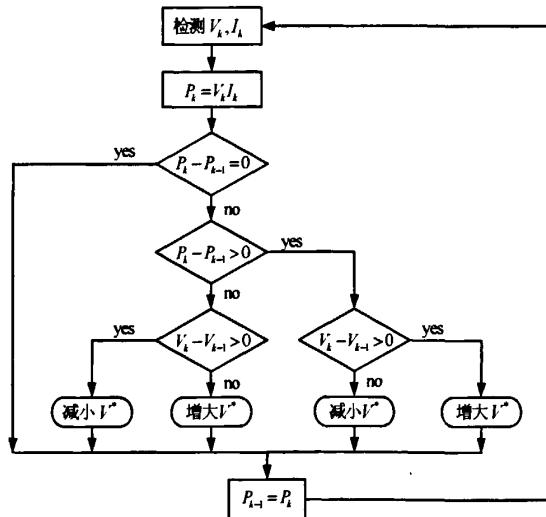


图 2-11 扰动观测法算法流程图

在光伏发电系统仿真过程中, 如果仿真的尺度比较大, 而MPPT算法响应比较快,

此时可以假定系统工作在最大功率状态,相应的控制器模型可加以简化。当MPPT算法的响应时间与仿真时间尺度相耦合时,此时需要考虑到具体算法的影响。在实际的稳定性仿真计算方法中,图 2-11 给出的算法流程由于是离散的计算过程,应用在实际的以连续状态方程形式描述的分布式发电系统稳定性仿真算法中具有一定的困难,因此在算法中一般可以采用以PI调节器^[101]模拟MPPT算法,替代图 2-11 的计算流程,该MPPT算法模块可以作为DC-DC通用化准稳态模型中的一部分控制器的一部分。

2.2.4 燃料电池

燃料电池是一种以氢为主要燃料,把燃料中的化学能通过电化学反应直接变成电能的高效、环保和安静的能量转换装置。燃料电池的种类很多,不同类型的燃料电池其输出特性各不相同,需要采用不同的动态模型来加以描述,本节以比较典型的高温固体氧化物燃料电池(SOFC)为例,以氢气和氧气反应生成水作为主要化学反应过程,说明燃料电池的动态模型。图 2-12 所示的典型燃料电池稳定性仿真模型^{[102][103][104]},由四部分组成:运行电流量测环节、燃料平衡控制系统、电化学动态过程和电气部分。

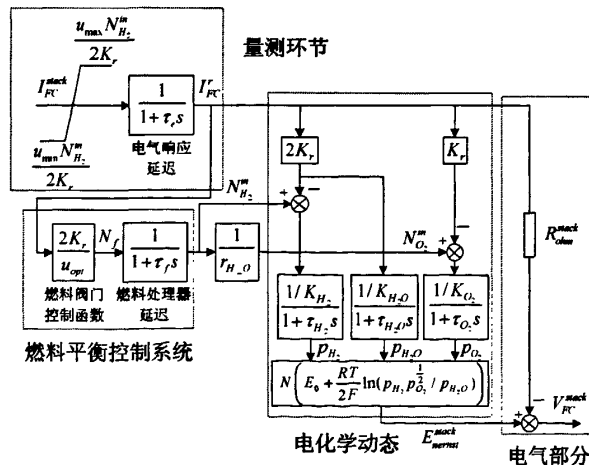


图 2-12 燃料电池堆典型中期动态模型框图

对于稳定性仿真计算而言,忽略在电气部分中的短期双电层效应电容效应的影响,而是采用考虑欧姆损耗确定的电路方程形式与外网相连,气体压力动态模型(电化学动态过程)以及燃料控制系统构成了燃料电池堆内部的微分动态过程,如果需要考虑更长时间的热力学动态过程,则可以对燃料电池堆中温度的变化进行详细建模,构成长期动态模型。

此外,若反应物 H_2, O_2, H_2O 均以气态形式存在,则相对应的分压力均需计及;若 H_2O 为液态形式,则其分压力可以忽略(例如低温质子交换膜燃料电池

(PEMFC))。图 2-18 中假设反应堆中的反应物均以气态形式存在。以下对各个部分分别加以介绍。

1) 电化学动态过程

燃料电池动态模型是模拟反应物(H_2 、 O_2 或 H_2O)在反应堆中的气体分压力变化过程,该过程由化学平衡方程确定,模型状态变量为反应物分压力值,结合反应堆内温度即可计算出整个燃料电池堆可逆开路电压 $E_{\text{Nernst}}^{\text{stack}}$,因此中期动态仿真模型也称为电化学模型。下面以 H_2 为例简单介绍气体分压力变化的计算原理 [105][106][107]。

H_2 分压力的变化可以用理想气体方程表示:

$$p_{H_2} V_{an} = n_{H_2} RT \quad (2-13)$$

式 (2-13) 中, p_{H_2} 是氢气分压力(atm); V_{an} 是阳极处反应物 (即 H_2) 体积(m^3); n_{H_2} 是阳极处氢气的物质的量(mol); R 为气体常数($8.314J/(K \cdot mol)$); T 是电池堆运行温度(K)。对式 (2-13) 式两边微分,并进行相应的变换得到:

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} \frac{d}{dt} n_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (N_{H_2}^m - N_{H_2}^{out} - N_{H_2}^r) \quad (2-14)$$

式 (2-14) 中, $N_{H_2}^m$ 、 $N_{H_2}^{out}$ 、 $N_{H_2}^r$ 分别是氢气进量、出量和反应量的流速率(mol/s)。氢气出量流速率 $N_{H_2}^{out}$ 和氢气分压力 p_{H_2} 之间存在正比例关系:

$$N_{H_2}^{out} / p_{H_2} = K_{H_2} \quad (2-15)$$

式 (2-15) 中, K_{H_2} 是氢气阀门摩尔常数($mol/(s \cdot atm)$)。根据基本的电化学关系,氢气的反应流速率为:

$$N_{H_2}^r = \frac{NI_{rc}^r}{2F} = 2K_r I_{rc}^r \quad (2-16)$$

式 (2-16) 中, N 为反应过程中电子个数, F 为法拉第常数($96485C/mol$), $K_r = N/4F$ 为常数, I_{rc}^r 为经过量测环节处理后的用于燃料平衡控制系统的运行电流值。将式 (2-15), (2-16) 代入式 (2-14), 并进行拉普拉斯(Laplace)变换可得到:

$$p_{H_2}(s) = \frac{1/K_{H_2}}{1 + s\tau_{H_2}} (N_{H_2}^m - 2K_r I_{rc}^r) \quad (2-17)$$

式 (2-17) 中, $\tau_{H_2} = V_{an} / (RTK_{H_2})$ 。 O_2 和 H_2O 同理可推导相对应公式,即构成了燃料电池反应堆的电化学动态方程。

2) 燃料平衡控制系统^{[102][103]}

考虑到在受到扰动之后燃料气体动态响应过程, 燃料平衡控制系统的作用是确保燃料电池运行在安全可靠的范围之内, 对燃料电池堆运行电流 I_{FC}^{stack} 进行控制, 进而控制天然气的进量流速率 N_f (mol/s), 图 2-12 中反应堆对运行电流 I_{FC}^{stack} 变化的响应需要一定的时间, 该延迟称为电气响应延迟, 常用一阶惯性环节进行模拟, 时间常数一般为 0.8s 左右 (即 $\tau_e=0.8s$), 该值和燃料电池自身特性有关。其输出 I_{FC}' 为经过量测环节处理后的用于燃料平衡控制系统的运行电流值, V_{FC}^{stack} 为燃料电池堆输出直流电压。燃料电池利用率的公式为:

$$u = \frac{N_{H_2}'}{N_{H_2}^m} \quad (2-18)$$

式(2-18)中, $N_{H_2}^m$ 和 N_{H_2}' 分别代表氢气进量和反应量的流速率(mol/s)。将式(2-16)代入式(2-18)可得到燃料电池利用率和运行电流以及氢气进量流速率的函数关系:

$$u = \frac{N_{H_2}'}{N_{H_2}^m} = \frac{2K_r I_{FC}'}{N_{H_2}^m} \quad (2-19)$$

一般情况下利用率因子 u 设定在 80%~90%之间 (即 $u_{\min}=0.8$, $u_{\max}=0.9$) 是安全运行范围, 由此导出电池运行电流的安全运行范围为^[105]:

$$\frac{0.8N_{H_2}^m}{2K_r} \leq I_{FC}^{stack} \leq \frac{0.9N_{H_2}^m}{2K_r} \quad (2-20)$$

该电流安全限制条件在量测环节中采用终端限幅环节来模拟。根据公式(2-19)还可以得到燃料阀门控制函数:

$$N_{H_2}^m = \frac{2K_r}{u_{opt}} I_{FC}' \quad (2-21)$$

式(2-21)中, u_{opt} 是给定的最佳利用率因子, 该式表示燃料进量阀门是通过运行电流的变化进行控制的。

燃料平衡控制系统含有燃料处理器, 其延迟通常用一阶惯性环节进行模拟, 延迟的时间常数和燃料电池自身特性有关, 对于 SOFC 而言该响应一般在 5s 左右 (即 $\tau_f=5s$)。燃料阀门控制函数和燃料处理器延迟环节构成燃料平衡控制系统。

3) 电气系统模型

这一部分主要由Nernst电压方程和欧姆定律确定决定, 在稳定性分析中, 一般仅仅考虑在电池内部的电阻压降损耗, 忽略聚集损耗(Concentration Losses)和

活化损耗(Activation Losses)的影响, 则电池外部的伏安特性可以用下面的Nernst 电压方程来实现:

$$\begin{cases} V_{FC}^{stack} = E_{FC}^{stack} - R_{ohm}^{stack} I_{FC}^{stack} \\ E_{FC}^{stack} = N_0 \left(E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \right) \end{cases} \quad (2-22)$$

其中 E_{FC}^{stack} 是开路反向电势(可逆开路电压), E_0 是标注反向电池电势, 其他符号和上述相同符号等价。该部分输出的燃料电池堆电压、电流 V_{FC}^{stack} I_{FC}^{stack} 将与DC-DC 变换器或者PWM逆变器直接相连。

2.2.5 蓄电池储能系统

蓄电池是一种电化学储能设备, 既能够将氧化还原反应所释放出的化学能直接转变成低压直流电能, 又能吸收电能转化为化学能储存, 目前是分布式发电系统中应用最为广泛的储能设备之一。根据所使用的化学物质不同, 可分为铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、钠硫电池、锂离子电池等。

蓄电池常通过逆变器直接并网或通过DC/DC变换器接逆变器并网, 为了简化研究常常忽略蓄电池自身的充放电动态, 用理想直流电压源或图 2-13 所示的简单等效电路作为蓄电池模型。图 2-19 所示简单等效电路模型由一个理想电压源串联电池内阻构成^[55]。特点是结构简单, 参数恒定, 适用于不考虑蓄电池动态特性的情况。该模型中, 蓄电池端电压与流过蓄电池电流的关系如下式所示:

$$V_b = E_0 - I_b R_i \quad (2-23)$$

式(2-23)中 E_0 为理想电压源,

另外一种等效模型称之为 Thevenin 等效电路模型, 由理想电压源 E_0 , 内阻 R_p , 过电压电容 C_0 和过电压电阻 R_0 组成。如图 2-14 所示。在实际中, 上述参数均随蓄电池荷电状态、电解液温度、蓄电池电流变化而变化, 但在应用 Thevenin 等效电路模型时, 假定所有参数为常量, 蓄电池的动态过程只由过电压电容反映。

Thevenin 等效电路模型可由下式(2-24)描述:

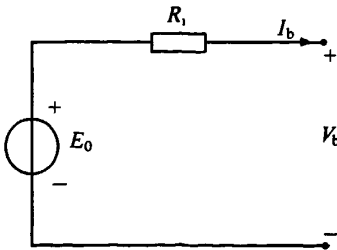


图 2-13 蓄电池简单等效电路模型

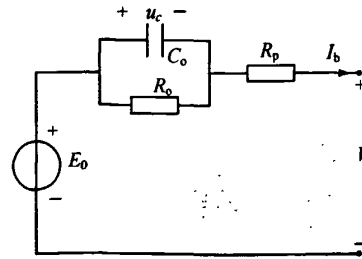


图 2-14 Thevenin 等效电路模型

$$\begin{cases} V_b = E_0 - u_c - I_b R_i \\ \frac{du_c}{dt} = \frac{1}{R_0 C_0} (I_b R_0 - u_c) \end{cases} \quad (2-24)$$

为克服Thevenin模型参数恒定的缺点,有学者在Thevenin模型基础上提出了改进Thevenin等效电路模型。该模型结构与原Thevenin等效电路模型相同,但该模型中考虑了各参数随蓄电池电流变化而变化的情况^[108]。

实际应用中,单个蓄电池的电压和容量往往不能满足系统的需求,需要将多个蓄电池串并联组成蓄电池组。以Thevenin等效电路模型为例,蓄电池组的等效电路如图2-15(a)所示。图中蓄电池组由 $m \times n$ 个蓄电池组成,其中 n 为并联支路数, m 为每条支路上串联的蓄电池个数。

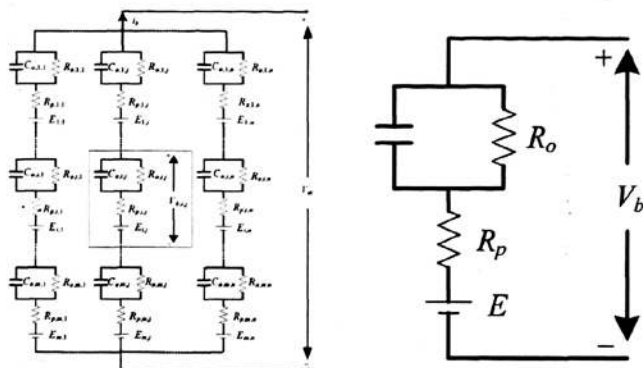


图2-15 (a) 蓄电池组电路

(b) 蓄电池组等效电路

蓄电池组的等效电路可以化简为如图2-15(b)所示的电路结构,与单个蓄电池等效电路结构相同。此时,简化后等效电路中的参数可由下式计算^[109]:

$$\begin{cases} E_b = mE_{b,j,j} / n \\ R_p = mR_{p,j,j} / n \\ R_o = mR_{o,j,j} / n \\ C_o = nC_{o,j,j} / m \end{cases} \quad (2-25)$$

2.3 电力电子准稳态模型的通用化设计

在分布式发电系统中,除了交流电机直接并网方式之外,更为普遍的形式是采用电力电子和交流电机连接之后并网,或者直接采用电力电子装置并网,因此电力电子装置的建模是整个分布式发电系统电气系统及其控制环节建模的极具特色的部分之一,有效且合理的描述在稳定性仿真中所采用的电力电子装置的动态特性,对于构建整个分布式发电系统具有重要意义。

分布式发电系统常用的电力电子装置的拓扑结构是多种多样的,本文讨论并

网运行的分布式发电系统电力电子装置的仿真模型,以下具体阐述稳定性分析中采用的电力电子装置准稳态模型。

2.3.1 电力电子装置准稳态模型

在分布式发电系统的稳定性分析中,一般不考虑电力电子变换器电路开关动态行为,仅仅考虑电路的基频模型,同时计及电力电子器件的控制器环节动态,称为准稳态模型。本节针对分布式发电系统常用的两种可控电力电子变换器—PWM变频器、DC-DC变换器,给出相应的准稳态模型^{[110][111]}描述。

2.3.1.1 PWM变频器准稳态模型

在风力发电系统、燃气轮机并网系统中经常采用PWM变频器并网,变频器由PWM换流器(整流器、逆变器)、直流部分组成。在分布式发电系统中,电压源型PWM换流器应用较多。

图2-16(1)给出了一个典型的交流电源并网实例^[56],永磁同步发电机输出经整流器整为直流电后,通过逆变器并网。系统中整流器、逆变器均为电压源型PWM换流器,PWM整流器和逆变器在电路结构上没有什么区别,只是功率变换的方向不同,以及控制方式有所不同,准稳态模型在结构上是相似的。

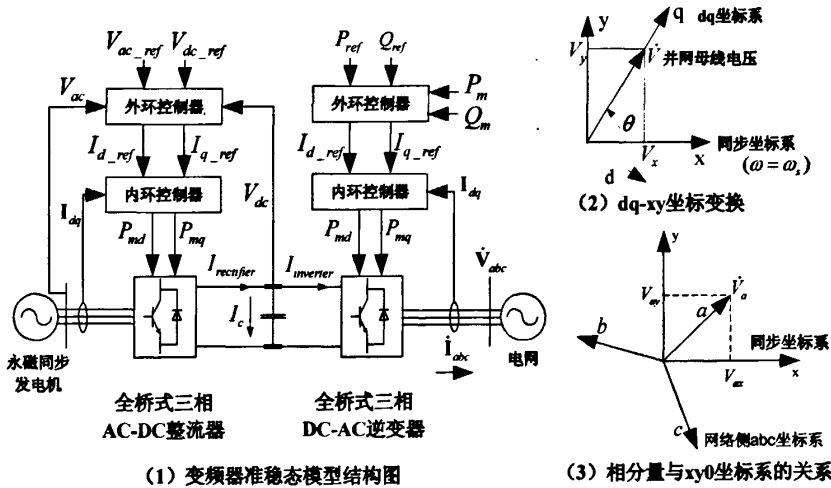


图 2-16 变频器准稳态模型以及坐标变换原理

逆变器准稳态模型在dq0坐标系下建模,适合于单逆变器无穷大母线系统的分析,但是当多逆变器接入系统时,由于网络为正序建模,或三相建模,这就涉及到逆变器与网络接口的坐标转化问题。需要将dq分量转化为xy分量,如图2-16(2),与正序网络接口或将三序xy分量合成为相分量与三相网络接口,如图2-16(3)。

图 2-16 (2) 给出了网络相分量和同步坐标直接的转换关系, 图 2-16 (3) 为 dq0 坐标系和 xy0 坐标直接的坐标变换原理。其中坐标变换角度为并网母线电压同步坐标分量之间夹角 θ (假设 q 轴超前与 d 轴 90 度), 这与发电机网接口采用功角原理是有所区别的, 具体接口计算原理请参见附录 A。

网络侧以同步坐标系建模为例, 换流器对应的稳态模型如图 2-17 所示。由于逆变器内部晶闸管电容的周期性充放电效应, 导致逆变器内部存在固有空载损耗, 空载损耗平均值基本上和直流电压 V_{dc}^2 成正比, 因此可以采用在直流电路侧并联的电阻 R_l 来模拟。在稳定性仿真计算中, 按照以往惯例, 交流网络侧采用标么值系统进行求解, 直流侧采用标么值表达困难, 因此采用有名值计算。

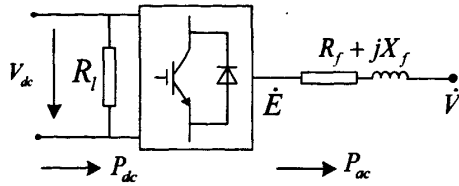


图 2-17 PWM 换流器的稳态模型

在图 2-17 中, \vec{E} 为换流器内电势 (即受调制电压) 相量, $R_f + jX_f$ 为换流器出口馈线参数, \vec{V} 为并网母线电压相量。采用 PWM 矢量调制方式, 有以下关系成立:

$$\begin{cases} E_d = k_0 P_{md} V_{dc} / V_{acBASE} \\ E_q = k_0 P_{mq} V_{dc} / V_{acBASE} \end{cases} \quad (2-26)$$

式 (2-26) 中, P_{md} 、 P_{mq} 为换流器脉宽调制系数 dq 矢量解耦控制分量, k_0 为调制因子, 在正弦波调制方式下 $k_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}$ 。 V_{acBASE} 为交流侧电压基值, V_{dc} 表示直流电压有名值。

逆变器出口处馈线电压平衡方程可以写为式 (2-27):

$$\begin{cases} E_q = V_q + R_f I_q + X_f I_d \\ E_d = V_d + R_f I_d - X_f I_q \end{cases} \quad (2-27)$$

PWM 换流器有功功率等于并网输出功率加上馈线铜耗:

$$P_{ac} = V_x I_x + V_y I_y + (I_x^2 + I_y^2) R_f \quad (2-28)$$

计及换流器的损耗情况下, 换流器交流侧输出有功功率和直流侧输入有功功率的关系为 (均为有名值计算):

$$P_{dc} = V_{dc} I_{dc} = P_{loss} + P_{ac} = \frac{V_{dc}^2}{R_l} + P_{ac} \quad (2-29)$$

根据电流控制方式的不同, 换流器分为电流开环控制和电流闭环控制。电流开环控制的优点是结构简单, 无需电流传感器, 但稳定性差, 动态响应慢。引入

电流反馈实现闭环控制后,可提高系统的抗干扰能力和动态特性,具有较大的优点。常见典型的电流闭环控制方法有:基于三相静止坐标系的控制策略,包括电流滞环控制^[112],预测电流控制^[113],幅相控制^[114]等。基于同步旋转坐标系的控制策略,包括单端直流电压的矢量控制^[115],双端电压的矢量控制^[56],基于功率外环的矢量控制^[116]等。在三相静止坐标系下,电流环的给定信号是正弦波,不易实现无静差控制效果,因此目前电压源型换流器的控制一般选用如图 2-16 左侧所示的基于dq旋转坐标系的解耦矢量控制。

1) PWM 整流器控制系统

整流器对永磁同步电机输出的三相交流电进行整流,为了快速调节电机输出功率,达到缩短系统动态响应时间的目的,可以采用双端恒电压矢量控制作为外环,电流控制器作为内环,控制电机机端电压幅值和变频器直流电压稳定输出。电压控制器对应的详细模型如图 2-18 所示^[116],

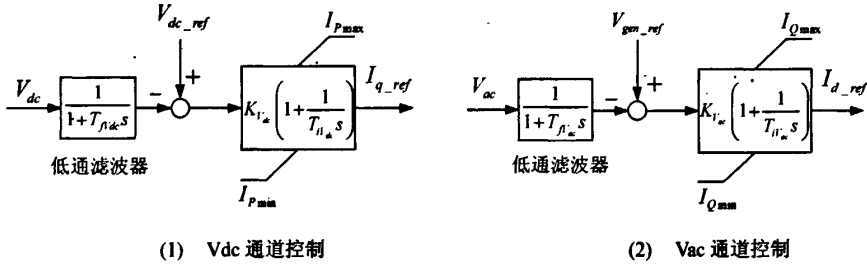


图 2-18 电压控制模块

V_{dc} 为直流电压测量值, V_{ac} 为机端电压测量值, 经过低通滤波器之后滤除高频分量, V_{ac_ref}, V_{dc_ref} 为输入参考值, I_{d_ref}, I_{q_ref} 为电流控制器控制指令。 $K_{V_{dc}}, T_{iV_{dc}}, K_{V_{ac}}, T_{iV_{ac}}$ 为 PI 控制器参数, $T_{fv_{dc}}, T_{fv_{ac}}$ 为滤波常数。

电流控制器是控制环节最快速的响应部分, 反应了整流器的精细调节作用。电流控制环节实现了电流的无静态误差跟踪, 并且将电流控制信号转化为电压控制信号。电流控制模块如图 2-19(1)所示。调制信号要满足 $0 \leq P_m = \sqrt{P_{md}^2 + P_{mq}^2} < 1$, 才能实现正常的 PWM 调整, 因此需对调制信号 P'_{mq}, P'_{md} 进行限幅处理^[56], 输出限幅器图 2-19 (2) 所示。 K_d, T_d, K_q, T_q 为 PI 控制器参数。 P_{md}, P_{mq} 为调制信号。

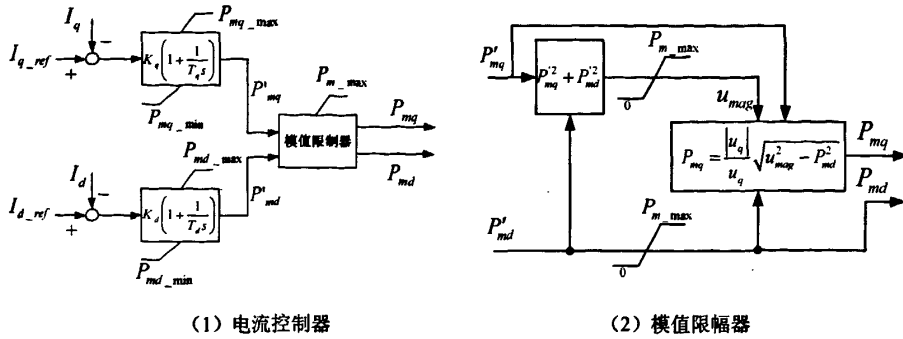


图 2-19 电流控制模块

2) PWM 逆变控制系统

对于分布式电源并网逆变器, 根据分布式电源的类型、在系统中所起作用等的不同, 需要采取不同的控制策略, 常见的分布式电源并网逆变器的控制方法有:

(1) 恒功率控制 (又称: PQ 控制); (2) 下垂控制; (3) 恒压恒频控制 (又称: V/f 控制)。这些控制方法外环结构有所差异, 电流控制模块和图 2-19 相同。

图 2-20 为典型恒功率控制方式^[56], 恒功率控制目的是根据网络侧负荷、功率参考值的变化自动调整分布式电源的输出。

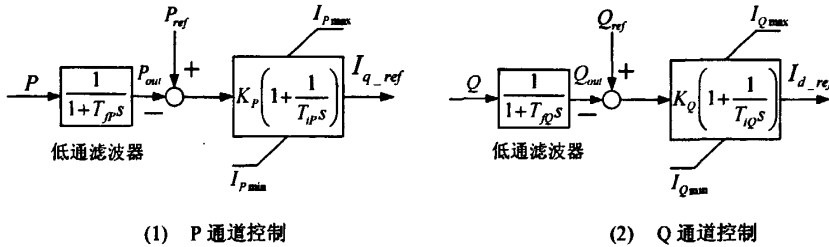


图 2-20 逆变器侧恒 PQ 控制模块

图中, P 、 Q 为逆变器输出有功、无功功率测量值, 经过低通滤波器之后滤除高频分量, P_{ref} 、 Q_{ref} 为输入参考信, I_{d_ref} 、 I_{q_ref} 为电流控制器控制指令。 K_p 、 T_{ip} 、 K_Q 、 T_{iQ} 为 PI 控制器参数, T_{ip} 、 T_{iQ} 为滤波常数。

当分布式发电系统采用微网形式进行供电, 处于孤岛状态或独立供电情况下, 具有一定有功储备电源、或结合储能装置使用的电源可以采用下垂 (Droop) 控制、恒频恒压 (V/f) 控制^[58]参与孤网内频率和电压的调节, 在恒功率控制模块上扩展相应外环控制模块即可实现, 如图 2-21, 2-22 所示。

V/f 控制采用 PI 控制器构成外环扩展部分, K_f 、 T_f 、 K_v 、 T_v 为 PI 控制器参数, V_s 、 f_s 为测量的并网母线电压幅值和频率, V_{ref} 、 f_{ref} 为参考值, P_{ref} 、 Q_{ref} 是功率参考值, 输出 P_{md} 、 P_{mq} 调制信号, 其他部分与恒 PQ 控制器相同。下垂控制采用比例

增益构成外环扩展部分, 比例增益为 K_f, K_v , 其他部分与恒 PQ 控制器相同。

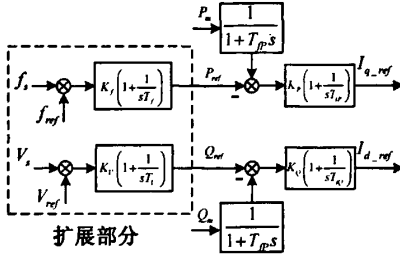


图 2-21 逆变器侧恒频恒压控制模块

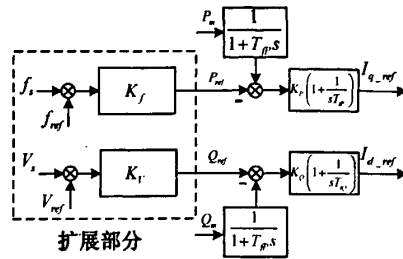


图 2-22 逆变器侧下垂控制模块

3) 锁相环动态模型 (PLL)

换流器中坐标变换需要提取母线相角信号, 提取相角的技术有很多种, 锁相环(Phase-Locked Loops) 是目前使用最普遍的相位同步方法。图 2-23 为其中一种简单实用的模型^[117], 电压同步分量 V_x, V_y 作为输入信号, 为了达到动态测量效果并消除误差, 通过一个 PI 控制器跟踪控制网络频率 ω 。若 $V_x \sin \theta = V_y \cos \theta$, 则认为相角为同步相角, 达到“锁相”目的, 通过积分器输出即为网络电压相角, 同时也可以输出母线频率 f 。

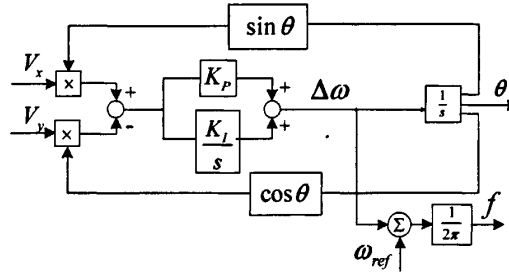


图 2-23 锁相环模型

4) 直流电容动态模型

直流电容动态模型也是变频器重要组成部分, 如图2-16, 直流侧电容部分存在如下电流平衡关系^[64]:

$$\begin{cases} C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_c = I_{dc}^{rectifier} - I_{dc}^{inverter} \\ I_{dc}^{rectifier} = \frac{P_{ac}^{rectifier} - P_{loss}^{rectifier}}{V_{dc}} \\ I_{dc}^{inverter} = \frac{P_{ac}^{inverter} + P_{loss}^{inverter}}{V_{dc}} \end{cases} \quad (2-30)$$

式 (2-30) 中 C 为直流电容值, I_c 为电容电流, $I_{dc}^{rectifier}, I_{dc}^{inverter}$ 为 PWM 整流器、

逆变器直流侧电流, $P_{ac}^{rectifier}$ 整流器交流侧吸收有功功率, $P_{loss}^{rectifier}$ 为整流器损耗, $P_{ac}^{inverter}$ 逆变器交流侧吸收有功功率, $P_{loss}^{inverter}$ 为逆变器损耗。

式 (2-26) — (2-30) 结合上述控制环节即构成了 PWM 变频器准稳态模型。

2.3.1.2 DC-DC变换器准稳态模型

由于传统的不控整流器存在着功率因数低的缺陷, 常常应用 DC-DC 变换器对其进行功率因数校正, 通过 DC/DC 变换器, 直流型分布式电源一方面可以得到较稳定的直流输出电压, 另一方面, 通过控制调制比可得到所需的电压与逆变器进行接口。基本的 DC-DC 变换器^[118]有 Buck、Boost、Boost-Buck、Cuk 电路等, DC/DC 变换器控制系统, 常用控制策略为单闭环控制^[119]和双闭环控制^[56]。双闭环控制系统为提高输出精度和改善动态特性, 采取了负反馈结构, 如图 2-24 (1) 所示。直流电压 V_{dc} 作为外环控制输入信号, V_{dc_ref} 为参考电压信号, I_{dc_ref} 为电流内环的参考信号, D 为调制比。图 2-24 (2) 为具体描述。

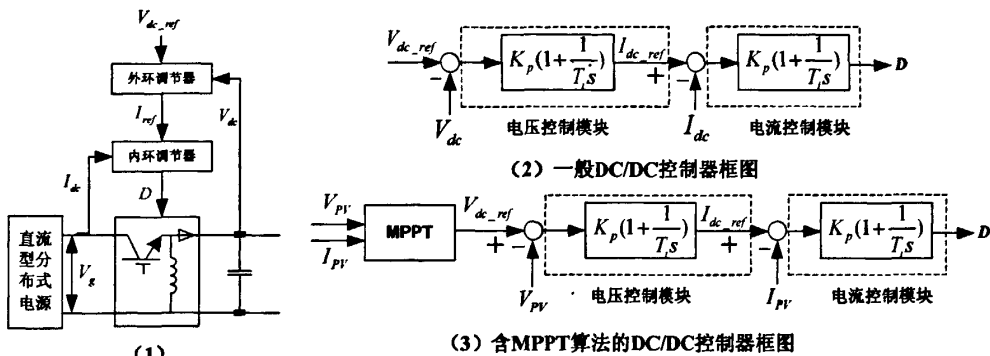


图 2-24 DC-DC 变换器准稳态模型

几种常用的 DC/DC 变换器稳态模型为

$$\text{Boost-Buck 变换器: } \frac{V_{dc}}{V_g} = \frac{D}{1-D} \quad (2-31)$$

$$\text{Buck 变换器: } \frac{V_{dc}}{V_g} = D \quad (2-32)$$

$$\text{Boost 变换器: } \frac{V_{dc}}{V_g} = \frac{1}{1-D} \quad (2-33)$$

式 (2-31) (2-32) (2-33) 中 V_g 为直流分布式电源的电压, V_{dc} 为 DC-DC 变换器输出电压。

除此之外, 对于光伏发电系统这种受环境变化影响比较显著的并网系统, 一般在 DC-DC 变换器控制环节加入最大功率跟踪 (MPPT) 算法以实现最佳运行点的跟踪。一种典型实现方案是将 MPPT 模块接入控制器的外环, 输入为光伏阵列电压电流 V_{pv}, I_{pv} , 输出为一般 DC-DC 变换器外环电压参考值 V_{dc_ref} 。外界环

境（如辐照度，温度）变化，导致光伏阵列电压电流 V_{PV}, I_{PV} 变化，通过控制占空比 D ，调整 DC-DC 变换器的输出直流电压，从而达到跟随环境变化而实现整个光伏发电系统以最大效率输出。

式（2-31）—（2-33）结合上述控制环节就构成了 DC-DC 变换器的准稳态模型。

2.3.2 通用化模型设计

分布式电源、电力电子控制系统的模型还在不断发展变化中，针对每一种模型发展相关的程序算法，将会给仿真系统的开发造成很多不便，不利于提高仿真程序的可靠性。目前大多数商业软件中缺乏适合于分布式发电系统稳定性分析的电力电子装置准稳态模型，部分软件（如DIGSIELNT）虽然提供了部分电力电子装置控制器准稳态模型，但是控制器建模不具备通用化特点^[120]。

典型分布式发电并网系统采用的控制方式以及相应的控制目标、控制变量选择列于下表 2-2。表中所示电源侧、并网侧电力电子控制结构均可采用多环控制结构实现，因此控制系统具有模块性特征，如果设计一种通用控制结构来统一描述各种控制方法以适应建模需要，无疑是对电力电子准稳态模型建模的最佳选择。本文基于文献 [58]采用的一种并网控制器结构，扩展出如图 2-25 所示通用电力电子准稳态模型（Generalized Power Electronics' Quasi-Steady-State Model，简称GQM），并应用于稳定性仿真建模。通用准稳态模型由两部分构成，一部分是代表PWM换流器、DC-DC变换器的稳态模型方程，另一部分就是通用控制器结构，控制器由各部分控制环节和一系列的开关环节组合而成，根据不同的开关状态可以组合成与不同的稳态方程相对应的控制结构，实现相对应的各种控制目的。

表 2-2 典型分布式发电并网系统电力电子控制方式、控制变量、控制目标

并网系统类型	分布式电源侧		网络侧	
	控制目标	控制变量	控制目标	控制变量
光伏电池	最大功率点输出 (MPPT 算法)	V_{PV}, I_{PV}	注入网络的 有功、无功功率	P_{ref}, Q_{ref} P, Q I_d, I_q, V_d, V_q
燃料电池	直流母线电压	V_{dc}, V_{dc_ref}	并网母线电压的 幅值、系统频率	V_{ref}, f_{ref} V_s, f_s I_d, I_q, V_d, V_q 采用下垂控制

微型燃汽轮机 (或恒频恒速 风力机组)	直流母线电压、 发电机端电压	V_{dc}, V_{dc_ref} V_{ac}, V_{ac_ref}		V_{ref}, f_{ref} V_s, f_s
蓄电池	直流母线电压	V_{dc}, V_{dc_ref}		I_d, I_q, V_d, V_q 采用恒频恒压控制
恒频变速风力 发电机	发电机角速度、 转子电流、磁链	ω_r, P_r, Q_r I_{dr}, I_{qr}	直流电容电压、电 网侧无功功率	V_{dc}, V_{dc_ref} Q, Q_{ref}

该通用控制器可以实现 PWM 换流器、DC-DC 变换器的典型控制方式，图 2-25 标出的路径均为 q 轴方向，d 轴结构与 q 轴结构对称。控制器中 u_d, u_q 是相关控制变量作为反馈信号输入控制器， u_{d_ref}, u_{q_ref} 是相对应的信号参考值。Droop 为下垂增益，和 $1/sT_1$ 与 $1/sT_2$ 构成比例积分环节，PI 为比例积分控制器。PLL 为锁相环。表 2-3 给出开关 $CB_1, CB_2, CB_3, CB_4, SW_1, SW_2$ 状态与控制方式对应关系。

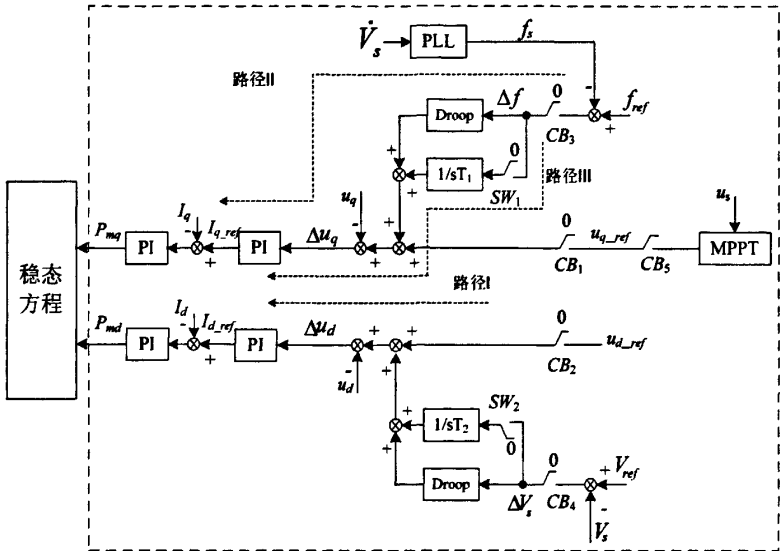


图 2-25 电力电子装置的通用准稳态模型

表 2-3 开关状态与控制方式对应关系

控制方式		开关状态							控制信号				
		CB ₁	CB ₂	CB ₃	CB ₄	SW ₁	SW ₂	CB ₅	u_{q_ref}	u_{d_ref}	u_q	u_d	u_s
PWM 换流器	恒 PQ 控制	合	合	开	开	开	开	开	P_{ref}	Q_{ref}	P	Q	/
	双端电压控制	合	合	开	开	开	开	开	V_{dc_ref}	V_{ac_ref}	V_{dc}	V_{ac}	/
	Droop 控制	开	开	合	合	开	开	开	/	/	P	Q	/
	VF 控制	开	开	合	合	合	合	开	/	/	P	Q	/
DC-DC 变换器	恒电压控制	合	开	开	开	开	开	开	V_{dc_ref}	/	V_{dc}	/	/
	含 MPPT 算法电压控制	合	开	开	开	开	开	合	V_{dc_ref}	/	V_{dc}	/	V_{pv} I_{pv}

通用模型的提出避免了分布式发电系统电力电子控制器重复设计缺陷,易于代码维护,在该通用控制器结构上适当扩展,可以得到功能更加完善和丰富的控制器类型。在后续的分布式发电系统模型叙述和软件设计过程电力电子部分均采用通用控制进行说明。

2.4 网络模型

分布式电源根据其容量和电压等级的要求,可能接入输电系统或者高压配电系统,例如大容量风力发电机组并联,以风电场的形式接入高压电网。这种情况和传统暂态稳定性仿真算法并无太大差别。网络模型仍然采用 $xy0$ 坐标系或 012 坐标系进行建模。

对于小容量(几百 KW-几十 MW)的微型燃汽轮机发电系统、燃料电池发电系统、小容量风力发电机组、光伏发电系统等,一般接入中低压配电系统,以微型电网的形式就近满足当地负荷的需求,然后若干个小型微网组成更大范围的微网,接入更高电压等级的网络。这种独特的系统结构需要对低压配电系统进行精细建模。

配电系统中分布式电源可以是单相的,也可能是两相或三相的形式;负荷可以是不平衡的,也可以缺相;线路呈阻性,且自阻抗或互阻抗参数可能不对称。这些不平衡情况导致在配电系统失去相序分离的特性,因此采用 abc 坐标系进行描述比较合适。配电网络中变压器可以是各种接线方式,如 Y , d 或者 D , yn 型,负荷或者投切电容器组也可以采用三角形不接地结构,若采用相电压、相电流对以上元件进行双端口建模,模型是不可逆的,这样给仿真求解工作带来困难^[121]。

本文在 abc 坐标系下对配电系统采用“相线分量”混合建模方法,即对网络三角形接线部分采用线电压、相电流进行双端口建模,消除不可逆情况。

2.4.1 变压器稳态模型

在输电系统暂态稳定性仿真计算中,采用 012 坐标系、 $xy0$ 坐标系描述各种接线形式的变压器模型已有大量讨论^[122],分布式发电系统接入配电侧,变压器宜采用 abc 坐标系统进行建模。下面以常用 $D, yn11$ ($\Delta/Y0-11$) 配电变压器为例,如图 2-26 所示,讨论变压器建模方法。

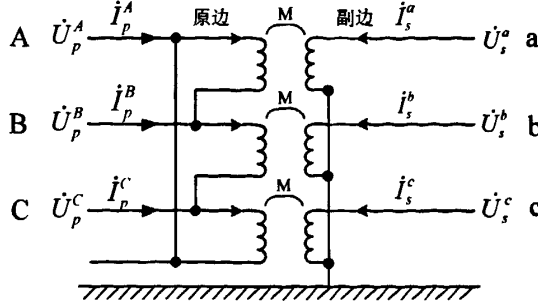


图 2-26 D, yn11 型变压器等值电路

记变压器的原边短路导纳（又称漏导纳）为 $y_T = \frac{1}{R_T} + j\frac{1}{X_T}$ ，变压器实用简化三

相模型可以忽略各相间的耦合，只保留原、副边线圈之间的耦合，原边线圈的自导纳 y_p ，副边线圈的自导纳 y_s ，同一铁芯柱上的原边线圈和副边线圈之间的互导纳 y_m 之间存在关系 $y_p = y_s = y_m = y_T$ 。若考虑变压器的非标准变比，表征变压器的节点电流向量 $\dot{\mathbf{i}}_n = [\dot{i}_p^A \ \dot{i}_p^B \ \dot{i}_p^C \ \dot{i}_s^a \ \dot{i}_s^b \ \dot{i}_s^c]^T$ 和节点电压向量 $\dot{\mathbf{V}}_n = [\dot{U}_p^A \ \dot{U}_p^B \ \dot{U}_p^C \ \dot{U}_s^a \ \dot{U}_s^b \ \dot{U}_s^c]^T$ 之间关系可以用下式表达：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p^A \\ \dot{i}_p^B \\ \dot{i}_p^C \\ \dot{i}_s^a \\ \dot{i}_s^b \\ \dot{i}_s^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_T}{\alpha^2} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} & \frac{-y_T}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \frac{-y_T}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{y_T}{\beta^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_p^A \\ \dot{U}_p^B \\ \dot{U}_p^C \\ \dot{U}_s^a \\ \dot{U}_s^b \\ \dot{U}_s^c \end{bmatrix} = Y_T \begin{bmatrix} \dot{U}_p^A \\ \dot{U}_p^B \\ \dot{U}_p^C \\ \dot{U}_s^a \\ \dot{U}_s^b \\ \dot{U}_s^c \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

式 (2-34) 中， α, β 为变压器原、副边的分接头， Y_T 为变压器节点导纳矩阵，由于原边是三角形不接地，因此 Y_T 是奇异的，无法并入全系统节点导纳矩阵之中参与网络求解。若将原边采用线电压代入式中， Y_T 维数将降为 5×5 ^[123]。则变压器的相线分量混合形式的稳态模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p^A \\ \dot{i}_p^B \\ \dot{i}_p^C \\ \dot{i}_s^a \\ \dot{i}_s^b \\ \dot{i}_s^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_T}{\alpha^2} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} & \frac{-y_T}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \\ \frac{-y_T}{\alpha\beta} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} & \frac{y_T}{\beta^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_p^{AB} \\ \dot{U}_p^{BC} \\ \dot{U}_s^a \\ \dot{U}_s^b \\ \dot{U}_s^c \end{bmatrix} = Y_T' \begin{bmatrix} \dot{U}_p^{AB} \\ \dot{U}_p^{BC} \\ \dot{U}_s^a \\ \dot{U}_s^b \\ \dot{U}_s^c \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

采用相分量与线分量混合表述的节点导纳矩阵 Y_T' 可以并入全系统节点导纳矩阵，由于线分量维数小于相分量，因此整个系统节点导纳矩阵维数小于 $3n \times 3n$ ， n 为系统的母线数。

若变压器某一侧存在三角形或者星形不接地的接线方式，均可采用上述思

路, 将不接地侧改为采用线对线电压, 则可得到相分量与线分量混合表述节点导纳矩阵, 如果变压器的两侧均不接地, 则两侧都采用线对线电压, 用线分量表述的节点导纳矩阵的维数降为 4×4 ^[123], 其他接地形式的变压器模型仍然可以采用相分量正常表达。

2.4.2 线路稳态模型

在 012 坐标系下和 $xy0$ 坐标系下的其他元件模型已有大量介绍^[28], 本节主要针对在分布式发电系统中常用的 abc 坐标系下配网元件的数学模型加以阐述。配电网基本是非对称的, 因此精确分析不应应对导体排列位置、导体型号和换位问题进行假设。1926 年卡森提出了一种计算任意数量架空线的自阻抗和互阻抗的方法, 该方法同样适用于地下电缆。通过卡森方法可以计算出线路的相阻抗矩阵和相导纳矩阵。配电线路精确模型为如图 3-2 所示的三相 π 型等值电路, 其中, 母线 i 和母线 j 分别为线路的入端母线和出端母线, Z_l 为线路的串联阻抗矩阵, Y_l 为线路的并联(对地)导纳矩阵。 Z_l 和 Y_l 皆为 $n \times n$ 复矩阵, n 为线路的相数, 当 n 取 1、2 和 3 时, 分别代表单相线路、两相线路和三相线路。

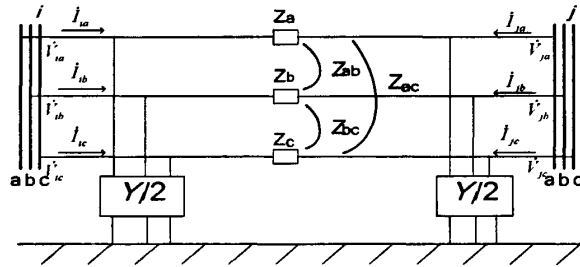


图 2-27 配电线路的精确模型

其中串联阻抗矩阵 Z_l 为

$$\mathbf{Z}_l = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

并联对地导纳矩阵为:

$$\frac{\mathbf{Y}_l}{2} = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

由式 (2-36) 和 (2-37), 得到线路的精确模型对应导纳矩阵 \mathbf{Y}_L 。

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_l^{-1} + \frac{1}{2} \mathbf{Y}_l & -\mathbf{Z}_l^{-1} \\ -\mathbf{Z}_l^{-1} & \mathbf{Z}_l^{-1} + \frac{1}{2} \mathbf{Y}_l \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

一般低压配电系统中配电线路忽略并联对地导纳的影响, 得到修正模型, 将式

(2-35) 代入式 (2-38), 忽略 $\mathbf{Y}_l/2$, 得到线路的修正模型对应的导纳矩阵:

$$\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_l^{-1} & -\mathbf{Z}_l^{-1} \\ -\mathbf{Z}_l^{-1} & \mathbf{Z}_l^{-1} \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

2.4.3 负荷稳态模型

配电静态负荷可以是星形接地、三角形三相平衡或不平衡负荷,也可以是单相或是两相接地负荷,如下图 2-28 所示。图中用 x,y,z 表示 a,b,c 三中的任意一种排列,也即表明单相或两相接地负荷可以接在任意一相或两相与地之间。

仿真计算中考虑配电系统的三相不平衡情况,由负荷节点的电压向量 $\dot{\mathbf{V}}$ 和负荷恒定模型参数,根据需要选择计算负荷导纳矩阵 \mathbf{Y}_L 、负荷注入电流向量 \mathbf{i}_L 、负荷注入功率向量 $\tilde{\mathbf{S}}_L$ 。具体计算可参看文献 [124], 这里以不接地三角形恒阻抗负荷为例说明问题。设配电负荷的复功率的基量为 $\tilde{\mathbf{S}}_{L0}$:

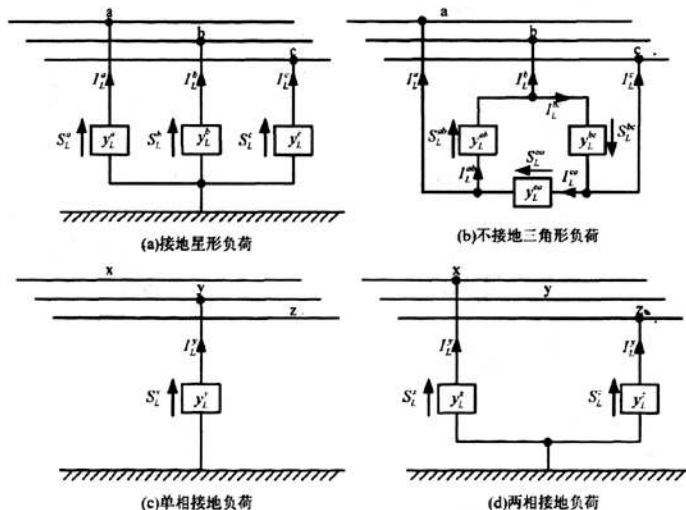


图 2-28 配电静态负荷模型

$$\tilde{\mathbf{S}}_{L0} = \begin{cases} [\tilde{\mathbf{S}}_{L0}^a, \tilde{\mathbf{S}}_{L0}^b, \tilde{\mathbf{S}}_{L0}^c]^T & \text{接地星形负荷} \\ [\tilde{\mathbf{S}}_{L0}^{ab}, \tilde{\mathbf{S}}_{L0}^{bc}]^T & \text{不接地三角形负荷} \end{cases} \quad (2-40)$$

(\wedge) 代表复数取共轭, 导纳元素可以写为:

$$\begin{aligned} y_L^{ab} &= -\hat{\mathbf{S}}_{L0}^{ab} / |\dot{\mathbf{V}}^{ab}|^2 \\ y_L^{bc} &= -\hat{\mathbf{S}}_{L0}^{bc} / |\dot{\mathbf{V}}^{bc}|^2 \\ y_L^{ca} &= -\hat{\mathbf{S}}_{L0}^{ca} / |\dot{\mathbf{V}}^{ca}|^2 = (\hat{\mathbf{S}}_{L0}^{ab} + \hat{\mathbf{S}}_{L0}^{ca}) / |\dot{\mathbf{V}}^{ca}|^2 \end{aligned} \quad (2-41)$$

如前所述, 对于不接地元件, 宜采用相线分量混合形式进行描述, 三角形恒阻抗

负荷上流过的线电压、相电流之间关系为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_L^{ca} + y_L^{ab} & y_L^{ca} \\ -y_L^{ab} & y_L^{bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

负荷导纳矩阵 $\mathbf{Y}_L = \begin{bmatrix} y_L^{ca} + y_L^{ab} & y_L^{ca} \\ -y_L^{ab} & y_L^{bc} \end{bmatrix}$ ，可直接并入节点导纳矩阵中。不接地三角形恒电流、恒功率负荷模型与恒阻抗模型相类似可以采用相线分量混合表达。其他接线方式的负荷模型仍然可以采用相分量完全表达。

2.4.4 并网元件与网络接口

在分布式发电系统稳定性仿真计算中，并网元件如同步发电机、异步感应电动机、异步感应发电机，或者是 PWM 逆变器等均是在 $dq0$ 坐标系统下建模，而对于多机多换流器系统，网络宜采用 $xy0$ 、 abc 坐标系建模，为了联立分布式发电并网系统和网络组成全系统模型进行求解，需要处理并网元件和网络接口计算问题。

三种元件模型虽然有所不同，但是其并网端电气部分均可用三序等值电路建模，然后通过对称分量法将序电路变换为相分量表示的电路，和三相网络接口。如图 2-29 所示。为了叙述方便起见，1, 2, 0 代表正、负、零，规定电流方向以流入网络为正。此处假设发电机是内电势平衡^[125]，因此发电机负序、零序网络是无源的，这一假设同样适用于异步电机、PWM 换流器。

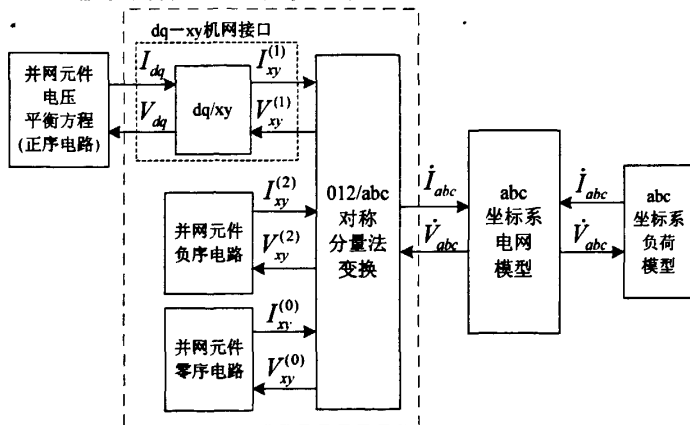


图 2-29 并网元件与 abc 坐标系电网模型的接口方法

1) 同步电机与网络接口

图 2-30 为同步电机三序等值电路图^[126]，规定电流方向以流入网络为正，电量都是用相量形式表示，参数均为标么值。次暂态电抗 X_d'' 即为正序电抗 X_1 ， $R_1 + jX_1, R_2 + jX_2, R_0 + jx_0$ 为三序阻抗。 $\dot{V}_{d1}, \dot{V}_{d2}, \dot{V}_{d0}$ 和 $\dot{I}_{g1}, \dot{I}_{g2}, \dot{I}_{g0}$ 分别为机端三序电压相量和流经电机的三序电流相量。

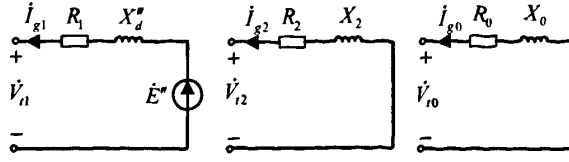


图 2-30 同步电机三序等值电路图

采用考虑凸极效应的迭代解法，发电机节点机网接口可用下图 2-31 表示：

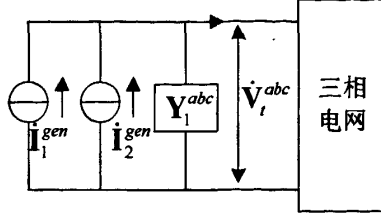


图 2-31 考虑凸极效应发电机与三相电网模型接口

图中 $\dot{\mathbf{i}}_1^{gen} + \dot{\mathbf{i}}_2^{gen}$ 为 abc 坐标系下发电机等值电流源复相量， $\dot{\mathbf{i}}_1^{gen}$ 与发电机内电势有关， $\dot{\mathbf{i}}_2^{gen}$ 与发电机的凸极效应有关， \mathbf{Y}_1^{abc} 为发电机等值导纳部分，可并入系统三节点导纳矩阵，以下式 (2-43) 是等值电流源公式：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{i}}_1^{gen} = \mathbf{Y}_1^{abc} \hat{\mathbf{E}}_g^{*abc} \\ \dot{\mathbf{i}}_2^{gen} = \mathbf{Y}_2^{abc} (\hat{\mathbf{E}}_g^{*abc} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{V}}_{t1}) \end{cases} \quad (2-43)$$

式中 $\hat{\mathbf{E}}_g^{*012}$ 为发电机内电势复相量， \mathbf{Y}_2^{abc} 是反映凸极效应的时变导纳矩阵， $\hat{\mathbf{V}}_{t1}$ 为正序端口电压相量， (\wedge) 表示复数取共轭。具体变量推导过程和定义可参见附录 A。

此外，当电机采用三序等值电路描述时，定子负序电流形成的空间磁场相对转子以约两倍同步速顺时针旋转，其产生的旋转力矩本质是一个异步制动力矩，根据电机原理导出相应公式，在转子运动方程中计及，零序电流产生的力矩同理可以计及^[126]。所采用的电机电磁转矩需要修改为三序转矩之和：

$$T_e = T_{g1} + T_{g2} + T_{g0} = (P_{g1} + P_{g2} + P_{g0}) / \omega_r \quad (2-44)$$

$$\text{式中} \begin{cases} P_{g1} = \text{Re} \{ \hat{\mathbf{E}}_g^{*} \hat{\mathbf{i}}_{g1} \} = \text{Re} \{ \hat{\mathbf{V}}_{t1} \hat{\mathbf{i}}_{g1} \} + \|\hat{\mathbf{i}}_{g1}\|^2 R_1 \\ P_{g2} = \|\hat{\mathbf{i}}_{g2}\|^2 R_2 \\ P_{g0} = \|\hat{\mathbf{i}}_{g0}\|^2 R_0 \end{cases}, \|\bullet\| \text{表示相量取模}$$

2) 异步电机与网络接口

与同步电机相类似，异步电机接口计算也可以采用上述方法^{[126][127][128]}，笼型感应电机可看作是同步电机的特例，即励磁电压恒为零，d轴、q轴参数相等，

转速为非同步速, 笼形感应电机实用模型的等效电路采用发电机惯例, 电流方向以流入网络为正, 如图 2-32 所示。

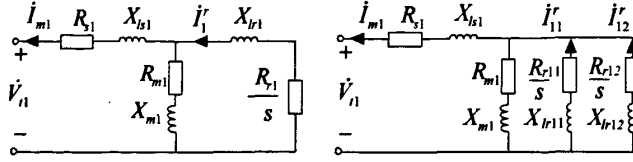


图 2-32 单鼠笼和双鼠笼感应电机的正序稳态等效电路

单鼠笼感应电机的正序稳态等效电路中, $Z_{s1} = R_{s1} + jx_{ls1}$ 为正序定子阻抗, $Z_{r1} = (R_{r1}/s) + jx_{lr1}$ 为正序转子阻抗, $Z_{m1} = R_{m1} + jx_{m1}$ 为正序励磁支路阻抗, $s = (\omega_0 - \omega_r)/\omega_0$ 为转差率; \dot{V}_{r1} 和 \dot{I}_{m1} 分别为机端电压和电流, \dot{I}_{r1} 为流经转子的正序电流; 对于双鼠笼感应电机, 在单鼠笼电机的基础上转子侧增加了一条并联支路, 参数和变量的说明同单鼠笼电机。

与同步电机不同, 笼型感应电机一般采用 Y 型不接地接线方式, 因此转子绕组不存在零序电路, 即整个模型不考虑零序电路, 其负序稳态等效电路如图 2-33 所示。相应负序参数与正序参数相对应。

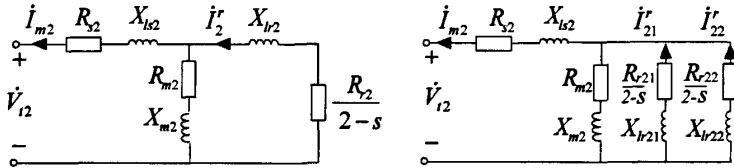


图 2-33 单鼠笼和双鼠笼感应电机的负序稳态等效电路

和同步电机相类似, 异步电机机网接口可用下图 2-34 表示:

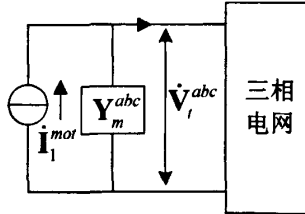


图 2-34 异步电机与三相电网模型接口

Y_m^{abc} 为等值导纳矩阵, 并入系统三相节点导纳矩阵, 等值电流源为 \dot{I}_1^{mot} , 具体变量推导过程和定义可参见附录 A。感应电机负序转矩与正序转矩反向, 此时所采用电磁转矩需要修改为:

$$T_e = T_{m1} - T_{m2} = (P_{mot1} - P_{mot2})/\omega_r, \quad (2-45)$$

式中, $P_{mot1} = \|\dot{I}_1'\|^2 \left(\frac{R_{r1}}{s} \right)$, $P_{mot2} = \|\dot{I}_2'\|^2 \left(\frac{R_{r2}}{2-s} \right)$ 。

双鼠笼感应电机的三序定子电压平衡方程与单鼠笼电机非常相似,在接口计算中采用次暂态电抗、次暂态电势代替单鼠笼电机中的暂态电抗、暂态电势即可。

3) PWM 换流器与网络接口

分布式发电系统中普遍采用电压源型 PWM 换流器,电路结构可用图 2-35 表示。图中 R_f, X_f, C_f 为逆变器调制电压出口处 LC 滤波电路参数, \dot{E}_{abc}^{PWM} 为换流器调制内电势, C_{dc} 为直流电容, \dot{V}_t^{abc} 为并网端母线电压。

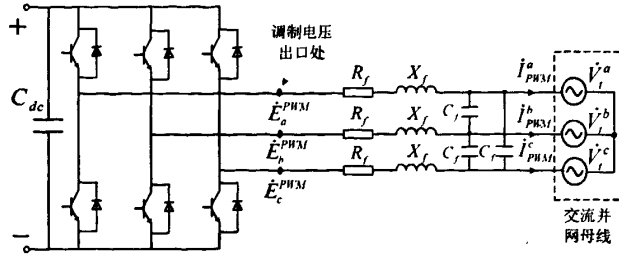


图 2-35 PWM 换流器电路结构图

PWM 换流器的接网模型和同步发电机类似,可以采用出口滤波线路正序、负序、零序电路^[55]表示,如图 2-36。

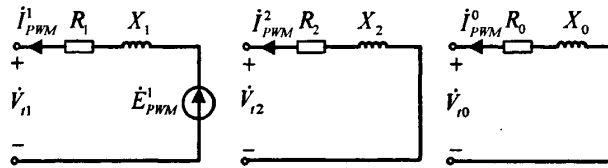


图 2-36 馈线电路稳态序网图

设图 2-35 中每一相滤波电路等值阻抗设为 $R_{PWM} + jX_{PWM}$, 考虑到参数平衡, 则可令 $R_1 = R_2 = R_0 = R_{PWM}$, $X_1 = X_2 = X_0 = X_{PWM}$, $\dot{V}_{t1}, \dot{V}_{t2}, \dot{V}_{t0}$ 和 $\dot{I}_{PWM}^1, \dot{I}_{PWM}^2, \dot{I}_{PWM}^0$ 分别为并网母线处三序电压相量、电流相量。与交流电机相类似, PWM 换流器与网络接口模型如图 2-37:

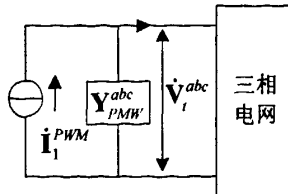


图 2-37 PWM 换流器与三相电网模型接口

其中 Y_{PWM}^{abc} 为换流器等值导纳矩阵, 并入系统三相节点导纳矩阵, 等值电流源为 \dot{I}_1^{PWM} , 具体变量推导过程和定义可参见附录 A。

确定了同步电机、异步电机、PWM 换流器和三相网络的接口模型，分布式发电并网系统和网络模型就组成了仿真全系统，可以采用相应的数值计算方法对该系统进行时域仿真计算。

将并网元件转化为等值电流源和等值导纳两部分，等值导纳并入节点导纳矩阵，等值电流源作为仿真求解中的注入电流部分。这种方式下求解方法有两种：考虑凸极效应的迭代解法与考虑凸极效应的牛顿解法。考虑凸极效应的迭代解法一般适合于显式交替求解算法和隐式交替求解算法，计及凸极效应和负荷的非线性时，注入电流是节点电压的函数，即网络方程可以用以下公式表达：

$$\dot{\mathbf{i}}_{abc}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{V}}_{abc}) = \mathbf{Y}_{abc}^{nei} \dot{\mathbf{V}}_{abc} \quad (2-46)$$

式中， \mathbf{x} 是和并网元件有关的状态变量， $\dot{\mathbf{V}}_{abc}$ 是节点电压， $\dot{\mathbf{i}}_{abc}$ 为并网元件的等值电流源， \mathbf{Y}_{abc}^{nei} 为并入并网元件等值导纳部分的修正节点导纳矩阵。

交替求解算法中网路方程求解部分 \mathbf{x} 是假设不突变的，式(2-46)可采用迭代方法求解 \mathbf{Y}_{abc}^{nei} ，同时更新 $\dot{\mathbf{i}}_{abc}$ ，迭代解法优点在于 \mathbf{Y} 三角分解之后无需更新，因子表定常，节省内存，计算速度快，对于发电机凸极效应和负荷非线性适应能力强。

考虑凸极效应的牛顿解法实质上是式(2-46)视为一组非线性方程组：

$$\mathbf{f}(\dot{\mathbf{V}}_{abc}) = \dot{\mathbf{i}}_{abc} - \mathbf{Y}_{abc}^{nei} \dot{\mathbf{V}}_{abc} \quad (2-47)$$

该方法适合于隐式联立求解方法，将微分方程差分代数方程之后和式(2-47)的网络非线性方程联立，采用牛拉法对其进行求解，该方法同样对发电机凸极效应和负荷非线性适应能力强，且联立求解没有交接误差。

本文采用考虑凸极效应的迭代解法作为并网元件接口计算的依据，并且将其融入到第三章提到的分布式发电系统稳定性算法框架之中。

2.5 分布式发电系统全模型描述

分布式发电并网系统由以上讨论的分布式电源或储能装置、电力电子装置、交流电机、网络几部分组成。系统结构图可以采用图 2-38 描述：

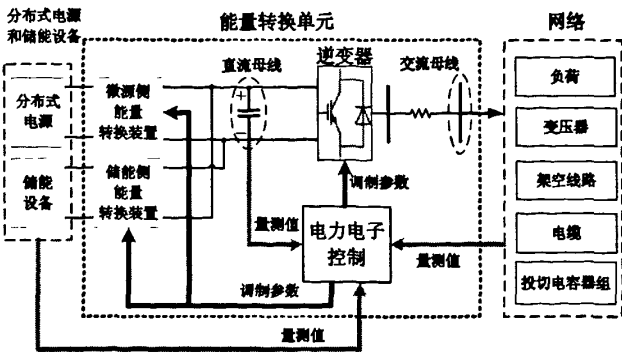
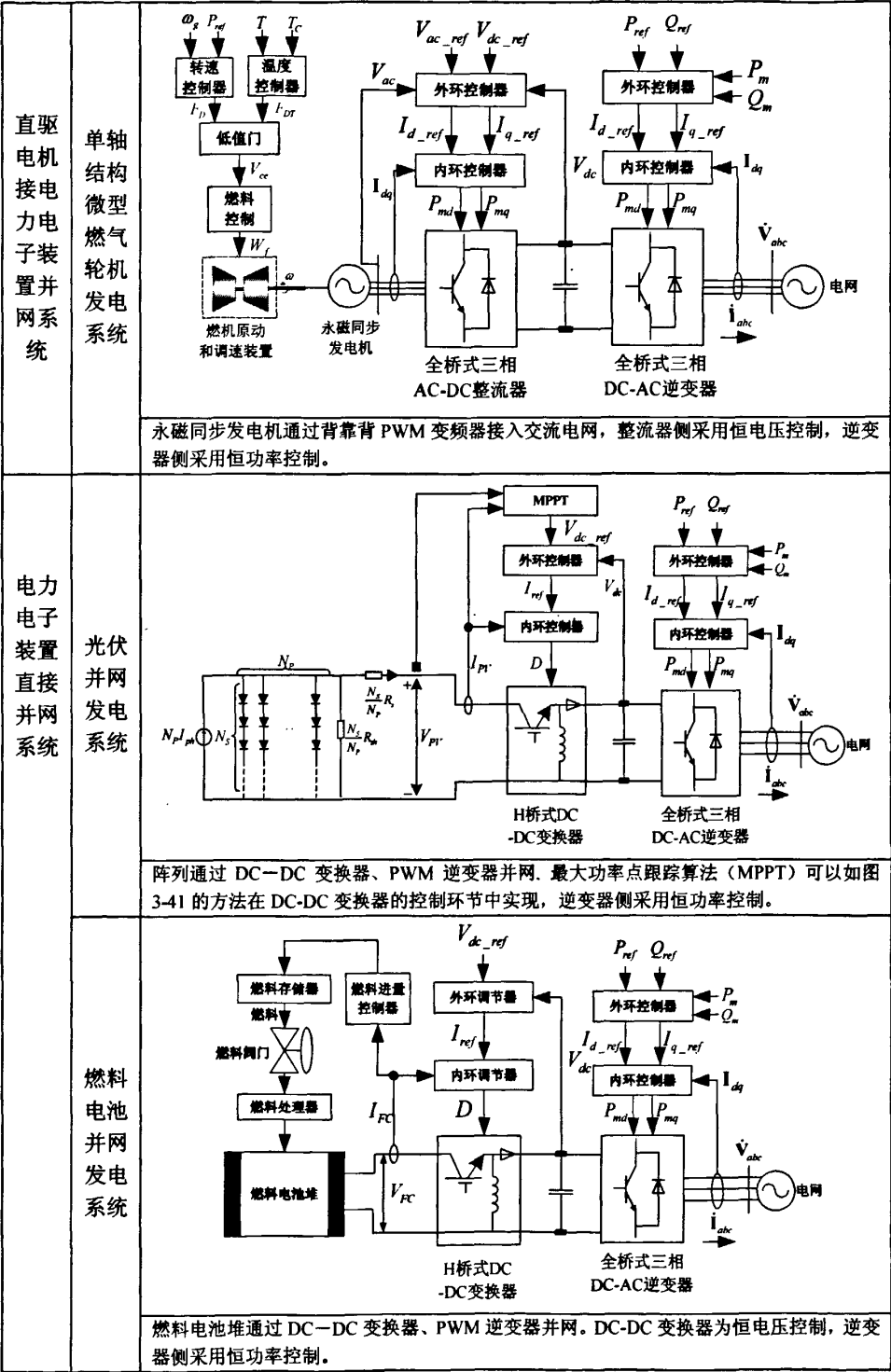


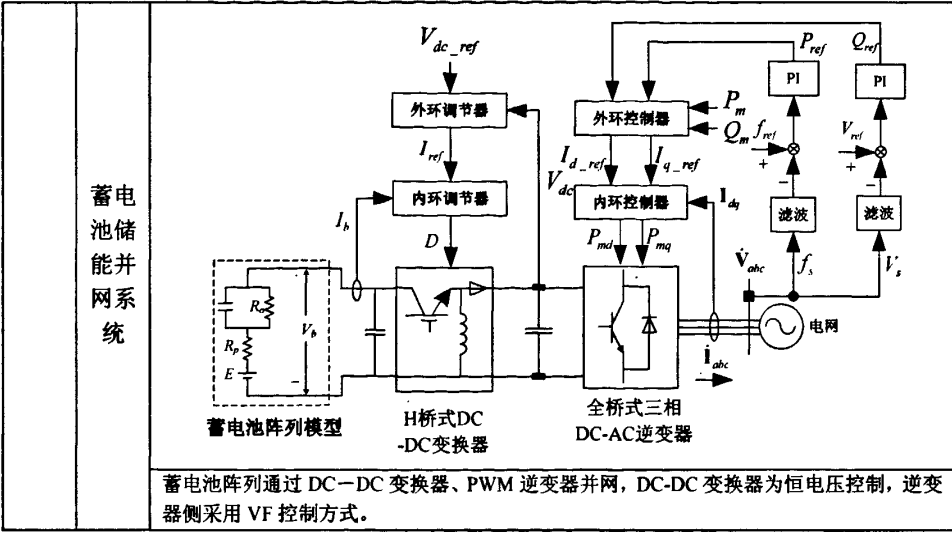
图 2-38 分布式发电系统结构图

将以上阐述的各种元件组合成图 2-38 所示的分布式并网发电系统是本章建模的最终目标，根据分布式电源或储能设备不同特性，分布式发电并网系统主要分为三类并网系统列于表 2-4，其分布式电源和储能元件的动态模型部分和本章前段所述内容一致，表中给出了相应的数学模型对应的公式和相应的并网结构说明。

表 2-4 典型分布式发电并网系统全模型描述

类型		并网系统结构
交流电机直接并网系统	分轴燃汽轮机并网发电系统	
	恒频恒速风力发电并网系统	
		并网异步电机采用单鼠笼型三阶异步感应电动机模型





2.6 本章小结

本章主要从“系统级-通用化”角度阐述分布式发电系统稳定性仿真的建模方法，主要介绍了分布式电源和储能装置、电力电子设备和配电网。最后阐述了三种分布式发电系统的基本构造，所有电力电子控制模型均可采用通用化准稳态模型实现。

所提出的方法和模型有助于规范化分布式发电并网运行系统的模型表达形式，为稳定性仿真数值计算方法研究奠定了基础。

第三章 分布式发电系统稳定性仿真算法

3.1 概述

电力系统暂态稳定性仿真本质上可以归结为对动力学系统时域响应的求取，它包括系统本身的数学模型和与之相适应的数值算法。对分布式发电系统而言，其数学模型包括两部分：一类是由系统的网络拓扑结构决定的电气约束方程，即 KCL 和 KVL 方程确定的节点电压方程；另一类则是由系统中各元件自身特性决定的动态方程。其中，第一类约束方程是由网络内的电压、电流的基频分量确定的准稳态代数方程，而第二类方程则可能是代数方程、微分方程、线性或非线性方程等多种形式。

同传统的电力系统仿真模型相类似，分布式发电系统也可以用一组微分和代数方程加以描述：

$$\begin{cases} \mathbf{F} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (3-1)$$

式 (3-1) 中第一式为系统的微分方程， \mathbf{x} 为系统状态变量。式 (3-1) 中第二式为网络的基频代数方程， \mathbf{y} 为系统代数变量。对于分布式发电系统而言，根据第二章建模的内容，本文对网络代数方程采用两种求解形式：

1) $xy0$ 坐标系统下实虚部分开的实数型方程形式，如式 (3-2)：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G} & -\mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_x \\ \mathbf{V}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_x \\ \mathbf{I}_y \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

其中， $\mathbf{y} = [\mathbf{V}_x \ \mathbf{V}_y]^T$ 为母线电压同步坐标系下实虚部分量， $\mathbf{I}_x, \mathbf{I}_y$ 为交流电机、PWM 换流器、非线性负荷节点的注入电流实虚部分量。

2) abc 坐标系统下实虚部分开的实数型方程形式，如式 (3-3)：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{aa} & -\mathbf{B}_{aa} & \mathbf{G}_{ab} & -\mathbf{B}_{ab} & \mathbf{G}_{ac} & -\mathbf{B}_{ac} \\ \mathbf{B}_{aa} & \mathbf{G}_{aa} & \mathbf{B}_{ab} & \mathbf{G}_{ab} & \mathbf{B}_{ac} & \mathbf{G}_{ac} \\ \mathbf{G}_{ba} & -\mathbf{B}_{ba} & \mathbf{G}_{bb} & -\mathbf{B}_{bb} & \mathbf{G}_{bc} & -\mathbf{B}_{bc} \\ \mathbf{B}_{ba} & \mathbf{G}_{ba} & \mathbf{B}_{bb} & \mathbf{G}_{bb} & \mathbf{B}_{bc} & \mathbf{G}_{bc} \\ \mathbf{G}_{ca} & -\mathbf{B}_{ca} & \mathbf{G}_{cb} & -\mathbf{B}_{cb} & \mathbf{G}_{cc} & -\mathbf{B}_{cc} \\ \mathbf{B}_{ca} & \mathbf{G}_{ca} & \mathbf{B}_{cb} & \mathbf{G}_{cb} & \mathbf{B}_{cc} & \mathbf{G}_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ax} \\ \mathbf{V}_{ay} \\ \mathbf{V}_{bx} \\ \mathbf{V}_{by} \\ \mathbf{V}_{cx} \\ \mathbf{V}_{cy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ax} \\ \mathbf{I}_{ay} \\ \mathbf{I}_{bx} \\ \mathbf{I}_{by} \\ \mathbf{I}_{cx} \\ \mathbf{I}_{cy} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

其中 $\mathbf{y} = [\mathbf{V}_{ax} \ \mathbf{V}_{ay} \ \mathbf{V}_{bx} \ \mathbf{V}_{by} \ \mathbf{V}_{cx} \ \mathbf{V}_{cy}]^T$ 为 abc 坐标系下的母线电压相分量实虚

部, 如果网络中存在不接地接线方式元件, 则电压是相线分量的混合形式。 $\mathbf{I}_{ax}, \mathbf{I}_{ay}, \mathbf{I}_{bx}, \mathbf{I}_{by}, \mathbf{I}_{cx}, \mathbf{I}_{cy}$ 为 abc 坐标系下计及凸极效应的发电机等效电流源 $\mathbf{i}_1^{gen}, \mathbf{i}_2^{gen}$ 、异步电机等效电流源 \mathbf{i}_1^{mot} 、PWM 换流器等效电流源 \mathbf{i}_1^{PWM} 以及负荷节点注入电流相分量, 012 形式的网络模型可以通过对称分量法变换为式 (3-3)。

式 (3-1) 中的微分方程组可以采用各种显式或隐式的方法对其进行差分化, 化为差分方程后与代数方程一起组成一组非线性代数方程组。可以采用联立求解法求解整个代数方程组, 也可以采用交替求解算法分别求解代数方程组和差分方程组。

3.2 分布式发电系统稳定性仿真算法

3.2.1 显式交替求解算法

在逆变器主导型低压微型电网的 (Inverter Dominated Unbalanced LV Microgrids) 的稳定性仿真研究中, 当考虑到电力电子装置控制器的快速动作时, 一个以逆变器接入的分布式电源或储能装置, 从网络侧可以看成是一个可控交流电压源, 系统的稳定性由逆变器控制模式决定。

在文献 [8][55]中讨论的可控电压源主要分为三类, 以有功/频率、无功/电压特性为基础的下垂控制、或V/f控制, 以及恒PQ控制, 这些控制方式均可采本文提出的电力电子通用化准稳态控制器来实现。由于仅考虑电力电子控制器的动态, 仿真中刚性问题不是很突出, 因此可以采用显式交替求解算法实现, 微分方程采用显式龙格-库塔法, 网络代数方程可以采用直接法、牛拉法迭代求解。

显式龙格-库塔(Runge-Kutta)法(简称为 R-K 方法)是一类高精度的单步法, 是稳定性计算中最早应用的数值计算方法之一, 其中四阶显式 R-K 法非常适合于 DAE 方程的交替求解。将式 (3-1) 显式差分化后如下式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (3-4)$$

交替迭代计算步骤如下:

- 1) 假设 $\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n$ 已知, 计算 $k_1 = hf(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n, t_n)$;
- 2) 计算相量 $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_n + \frac{k_1}{2}$, 然后求解代数方程 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1) = \mathbf{0}$ 得出 \mathbf{y}_1 , 计算向量 $k_2 = hf(\mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1)$;
- 3) 计算相量 $\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_n + \frac{k_2}{2}$, 然后求解代数方程 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2) = \mathbf{0}$ 得出 \mathbf{y}_2 , 计算向量 $k_3 = hf(\mathbf{x}_2, \mathbf{y}_2)$;

- 4) 计算相量 $\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_n + k_3$, 然后求解代数方程 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_3, \mathbf{y}_3) = \mathbf{0}$ 得出 \mathbf{y}_3 , 计算向量 $k_4 = h\mathbf{f}(\mathbf{x}_3, \mathbf{y}_3)$;
- 5) 最后计算 $\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$, 然后求解代数方程 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) = \mathbf{0}$ 得出 \mathbf{y}_{n+1} ;

为了消除交接误差带来的影响, 每次计算 k_1, k_2, k_3, k_4 之前, 均要准确求解网络代数方程 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) = \mathbf{0}$, 以提供和状态变量对应的代数变量值^[13]。

显式积分算法实现起来较为简单, 为了保持算法的稳定性, 需要采用较小的步长, 对于动态模型更为丰富的分布式发电系统, 分布式电源和储能装置、电力电子器件之间的时间常数差异很大, 需要采用数值稳定性更高的隐式算法来处理系统刚性问题。以下介绍常用的联立求解和交替求解形式的隐式梯形算法。

3.2.2 隐式联立求解算法

基于预测—校正形式的隐式联立求解法^{[25][26]} (Simultaneous solution) 是常用计算形式之一, 将式 (3-1) 中的微分方程组隐式差分和代数方程联立如式 (3-5) 所示, 其中, t 表示当前时刻, h 为积分步长。

$$\begin{cases} \mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{h}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n)] = \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (3-5)$$

联立求解计算步骤如下:

- 1) 在求解第 $n+1$ 步 $\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}$ 时, 为了加快校正步收敛性, 可以首先对 $\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}$ 进行预测。如式 (3-6), 采用单步欧拉法预测状态变量 \mathbf{x}_{n+1}^0 , 采用二阶外推法预测代数变量 \mathbf{y}_{n+1}^0 。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{n+1}^0 = \mathbf{x}_n + h\mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n) \\ \mathbf{y}_{n+1}^0 = \mathbf{y}_n^2 / \mathbf{y}_{n-1} \end{cases} \quad (3-6)$$

- 2) 校正阶段, 采用牛拉法迭代求解修正方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_G & \mathbf{B}_G \\ \mathbf{C}_G & \mathbf{D}_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \\ \Delta \mathbf{y}_{n+1}^{k+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{n+1}^k \\ \mathbf{g}_{n+1}^k \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

式 (3-7) 中, \mathbf{F}_{n+1}^k 、 \mathbf{g}_{n+1}^k 是第 k 步迭代残差量, $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$ 、 $\Delta \mathbf{y}_{n+1}^{k+1}$ 是状态变量和代数变量的修正量, $\mathbf{A}_G, \mathbf{B}_G, \mathbf{C}_G, \mathbf{D}_G$ 为分块雅克比矩阵, 如式 (3-8) 所示:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_G = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{I} - \frac{h}{2} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_{n+1}^k}} & \mathbf{B}_G = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} = -\frac{h}{2} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_{n+1}^k}} \\ \mathbf{C}_G = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_{n+1}^k}} & \mathbf{D}_G = \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \bigg|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_{n+1}^k \\ \mathbf{y}=\mathbf{y}_{n+1}^k}} \end{cases} \quad (3-8)$$

- 3) 更新 $\mathbf{x}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{x}_{n+1}^k + \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$, $\mathbf{y}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{y}_{n+1}^k + \Delta \mathbf{y}_{n+1}^{k+1}$, 当满足 $\max\{\mathbf{F}_{n+1}^k, \mathbf{g}_{n+1}^k\} \leq \xi$ (给定的误差允许值) 时, 则 $n+1$ 步计算迭代收敛, 否则代入第二步进行求解修正量。

在每一次迭代中, 预测方法的好坏直接影响校正步的收敛特性, 代数变量的预测主要方法有线性几何预测、平方几何预测等, 预测性能好坏对收敛性起到关键的作用, 而算法的稳定性仍然由校正步隐式积分求解算法决定^[13]。雅可比矩阵元素一般需求不断更新, 为了减少计算量, 可采用伪牛顿法 (VDNM), 在多次迭代时步中采用恒定雅可比矩阵 LU 分解结果进行计算。

隐式积分联立求解具有较好的数值稳定性。其算法不引入微分方程和代数方程的交接误差, 能够适应较长过程的稳定计算。但是在程序设计上较为复杂, 而且需要建立联立求解的修正方程, 导致程序的可扩展性和灵活性不足。

3.2.3 隐式交替求解算法

隐式交替求解法 (Alternating Solution) 是在时间步长上采用隐式积分方法对微分方程进行求解, 同时在时间步长上对代数方程进行求解, 两个求解过程是分别进行的。在总的求解过程中, 存在着网络代数方程组和微分方程组之间迭代的过程。原则上可以彼此独立地选择不同的方法交替求解系统的微分方程和网络代数方程。和联立求解法相类似, 可以采用预测-校正形式进行。

第 $n+1$ 步, 预测 $\mathbf{x}_{n+1}^0, \mathbf{y}_{n+1}^0$ 之后, 将式 (3-5) 该写成以下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{x}_n + \frac{h}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{y}_{n+1}^k) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n)] \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}^{k+1}, \mathbf{y}_{n+1}^{k+1}) = \mathbf{0} \end{cases} \quad (3-9)$$

交替迭代计算步骤如下:

- 1) 预测 \mathbf{x}_{n+1}^0 初值 $\mathbf{x}_{n+1}^0 = \mathbf{x}_n + h\mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n)$, 采用 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}^0, \mathbf{y}_{n+1}^0) = \mathbf{0}$ 预测 \mathbf{y}_{n+1}^0 初值 \mathbf{y}_{n+1}^0 ;
- 2) 应用式 (3-9) 第一式计算 \mathbf{x}_{n+1} 的新估计值 $\mathbf{x}_{n+1}^1 = \mathbf{x}_n + \frac{h}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}^0, \mathbf{y}_{n+1}^0) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n)]$;
- 3) 采用 \mathbf{x}_{n+1}^1 带入 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}^1, \mathbf{y}_{n+1}^1) = \mathbf{0}$ 解得新值 \mathbf{y}_{n+1}^1 ;
- 4) 转至第 (2) 步, 计算 $\mathbf{x}_{n+1}^2 = \mathbf{x}_n + \frac{h}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}^1, \mathbf{y}_{n+1}^1) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n)]$, 继续迭代, 当满足 $\|\mathbf{x}_{n+1}^{k+1} - \mathbf{x}_{n+1}^k\| \leq \xi$ (ξ 是给定的误差允许值) 时, 则 $n+1$ 步计算迭代收敛。

交替求解法中分布式发电系统的网络方程和动态元件方程接口由图 2-31、图 2-34、图 2-36 确定, 分布式发电并网系统动态模型的修改和增加并不影响网络方程的求解速度, 程序的开发和维护比较简单。缺点是存在微分和代数方程的交接误差。

3.3 基于数值微分求导的隐式交替求解算法

以上的分析可以看出,常规电力系统稳定性分析算法在分布式发电系统稳定性分析中均可采用,但是考虑到分布式发电系统模型的复杂度和分析问题的角度不同,宜用显式、隐式数值计算方法相结合的方式进行时域求解。隐式交替求解的仿真框架比较适合于分布式发电系统模型的更新和添加,但是由于差分方程采用一般的简单函数迭代方法,因此存在发散或者收敛很慢的问题;如果采用联立隐式求解方法,其特有的牛顿迭代稳定性一般来说比简单函数迭代要优越,但是需要形成雅可比矩阵,雅可比矩阵对于分布式发电系统的网络方程和动态元件方程接口的处理也比较困难,且联立格式不利于新模型的更新和添加。

一种最理想的方式是结合两种隐式算法的优点,采用交替求解框架,对于差分方程的求解采用稳定性较高的牛顿迭代格式。其中最关键的问题在于差分方程需要形成雅可比矩阵用于迭代求解,通过导数解析表达式直接计算雅可比矩阵中的元素是普遍采用的方法,但当求导数学模型具备较强的变结构或变参数特征时,求导是困难的。

利用对自变量进行扰动操作的数值微分法^[62]计算系统的雅可比矩阵元素是小于扰稳定性分析常用算法,此时的雅可比矩阵完全在原系统状态方程和代数方程的基础上直接通过数值计算获得,不需要事先获得雅可比矩阵元素函数的解析信息,可以自动计及系统模型结构突变时的影响,具有程序开发简单和可靠性高等优点。

基于以上的特点,本文将雅可比矩阵的数值微分求导法与预测-校正形式的隐式交替求解算法相结合,提出了一种适用于分布式发电系统稳定性仿真算法,同时将网络方程求解参与整个差分方程迭代过程,以消除交替求解的交接误差。

3.3.1 雅可比矩阵数值微分法基本原理

本文提出一种改进隐式梯形算法,采用一种新的交替求解格式实现预测-校正算法中的校正迭代求解。假定 \mathbf{D}_G 可逆,基本原理如下:

假设 $\mathbf{x}_{n+1}^k, \mathbf{y}_{n+1}^k$ 已知,在式(3-7)中通过对 $\Delta \mathbf{y}_{n+1}^{k+1}$ 进行消元运算,可将式(3-7)化简为:

$$-\mathbf{F}_{n+1}^k = \left[\mathbf{A}_G - \mathbf{B}_G (\mathbf{D}_G)^{-1} \mathbf{C}_G \right] \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} - \mathbf{B}_G (\mathbf{D}_G)^{-1} \mathbf{g}_{n+1}^k \quad (3-10)$$

不妨令:

$$\mathbf{A}_{sys} = \mathbf{A}_G - \mathbf{B}_G (\mathbf{D}_G)^{-1} \mathbf{C}_G \quad (3-11)$$

由于采用交替求解格式,代数部分和微分部分可以分别求解,在代数方程解附近式(3-10)右端第二项的代数残差约等于零,可采用式(3-10)右端项第一项作

为状态变量残差近似值, 则有:

$$-\mathbf{F}_{n+1}^k \approx \mathbf{A}_{sys} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} \quad (3-12)$$

采用式 (3-7) 第一式求解残差 \mathbf{F}_{n+1}^k 之后, 求解式 (3-12) 获得修正量 $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$; 更新状态变量: $\mathbf{x}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{x}_{n+1}^k + \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$ 。带入式 (3-7) 第二式可求解出 \mathbf{y}_{n+1}^{k+1} 。当满足 $\max \{\mathbf{F}_{n+1}^{k+1}\} \leq \xi$ (给定的误差允许值) 时, 则 $n+1$ 步计算迭代收敛。若不满足, 继续进行式 (3-12) 的迭代求解, 直到满足收敛标准。

由于采用的是交替求解的隐式梯形积分方法, 因此算法本身是收敛的, 并且本算法中将代数方程参与状态变量的迭代, 代数方程和状态方程是严格交接的, 可以消除由代数和状态变量交接不同步造成的交接误差, 同时和伪牛顿算法相结合的方式可以加快仿真速度。

在上述计算过程中, 式 (3-12) 中 \mathbf{A}_{sys} 的获取是关键步骤之一。若将 $\mathbf{A}_G, \mathbf{B}_G, \mathbf{C}_G, \mathbf{D}_G$ 表达式 (3-8) 带入式 (3-11), 可以得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{sys} &= \left(\mathbf{I} - \frac{h}{2} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right) - \left(-\frac{h}{2} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \right) (\mathbf{D}_G)^{-1} \left(-\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right) \\ &= \mathbf{I} - \frac{h}{2} \left(\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} (\mathbf{D}_G)^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \right) \\ &= \mathbf{I} - \frac{h}{2} (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) \end{aligned} \quad (3-13)$$

令 $\mathbf{A}_{ODE} = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x$, 根据式 (3-13), 差分方程牛顿迭代格式中所需的雅克比矩阵 \mathbf{A}_{sys} 和原系统 DAE 方程组降阶之后的雅克比矩阵 \mathbf{A}_{ODE} 存在着一一对应关系。可以通过求取 \mathbf{A}_{ODE} 进而获得 \mathbf{A}_{sys} 。

将式 (3-1) 给出的微分代数方程组在平衡点处线性化, 并消去代数方程, 可以得到下述小扰动状态方程形式:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) \Delta \mathbf{x} = \mathbf{A}_{ODE} \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (3-14)$$

采用数值微分方法计算 \mathbf{A}_{ODE} 的思路如下:

对 \mathbf{x} 中某一个状态变量 x_i ($i=1 \dots n$, n 为状态变量个数) 进行一个微小扰动, 令 $x'_i = x_i + \Delta x_i$, 定义 $\mathbf{x}' = [\dots x'_i \dots]^T$; 将扰动后 \mathbf{x}' 带入式 (3-1) 中的代数方程并求解可以得到代数变量的扰动值, 定义为 \mathbf{y}' ; 将得到的 \mathbf{x}', \mathbf{y}' 带入式 (3-1) 的微分方程, 可计算出状态变量导数的扰动值 $\dot{\mathbf{x}}' = [\dots \dot{x}'_i \dots]^T$, 则 \mathbf{A}_{ODE} 的元素为:

$$a_{ji} = \frac{\dot{x}'_j - \dot{x}_j}{x'_i - x_i} = \frac{\Delta \dot{x}_j}{\Delta x_i} \quad (3-15)$$

在预测点 $(\mathbf{x}_{n+1}^0, \mathbf{y}_{n+1}^0)$ 处可采用如上所述的数值微分扰动方法计算 \mathbf{A}_{ODE} , 进而得到 \mathbf{A}_{sys} , 然后采用伪牛顿法, 对式 (3-12) 迭代求解。整体算法求解过程如图 3-1 所示。

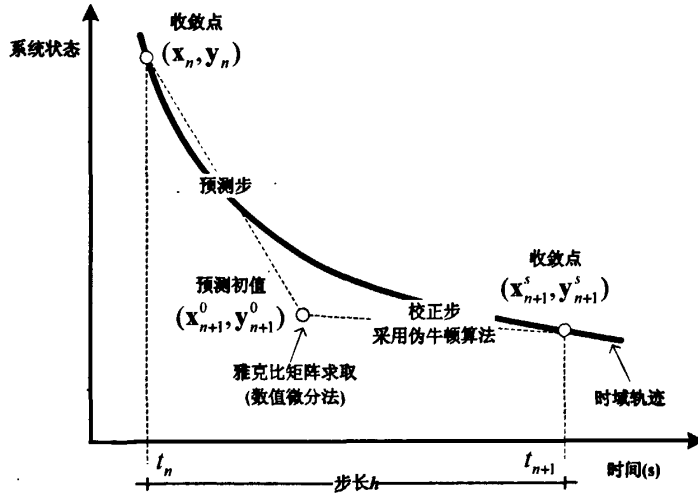


图 3-1 预测-校正型隐式梯形算法示意图

3.3.2 基于数值微分求导的隐式交替求解算法描述

基于上述计算 A_{ODE} 的数值微分方法，以下给出基于数值微分求导的预测-校正隐式交替求解算法主要步骤：

Step 1: 假设第 n 步的 x_n, y_n 已知，进行预测步求解

采用向前欧拉法预测状态变量初值 x_{n+1}^0 ，公式为：

$$x_{n+1}^0 = x_n + hf(x_n, y_n)$$

采用外推法或者网络迭代求解预测状态变量 y_{n+1}^0 ，公式为：

$$y_{n+1}^0 = (y_n)^2 / y_{n-1} \quad (\text{外推法})$$

Step 2: 进入校正步，假设第 k 步校正迭代次数达到雅可比更新迭代次数，则对

x_{n+1}^k 中每一个分量进行扰动计算 $x_{n+1}^{ik} = x_{n+1}^k + \xi x_{n+1}^k$ ，将 x_{n+1}^{ik} 带入式 (3-4)

第二式迭代求解扰动后的代数变量值 y_{n+1}^{ik} ，由 $x_{n+1}^{ik}, y_{n+1}^{ik}$ 带入 $f(x_{n+1}, y_{n+1})$ 可求得状态变量增量扰动后的值 \dot{x}_{n+1}^{ik} ，则相对应的降阶微分方程系统的雅可比矩阵为：

$$(A_{ODE})_{n+1} = [a_{ij}], \quad a_{ij} = \frac{(\dot{x}'_j)_{n+1} - (\dot{x}_j)_{n+1}}{(x'_i)_{n+1} - (x_i)_{n+1}} = \frac{\Delta \dot{x}_j}{\Delta x_i}$$

$$\text{且 } \begin{aligned} x_{n+1}^{ik} &= [\dots (x'_i)_{n+1} \dots]^T & \dot{x}_{n+1}^{ik} &= [\dots (\dot{x}'_j)_{n+1} \dots]^T \\ \dot{x}_{n+1}^{ik} &= [\dots (\dot{x}'_j)_{n+1} \dots]^T & \dot{x}_{n+1}^{ik} &= [\dots (\dot{x}_j)_{n+1} \dots]^T \end{aligned}$$

若未达到雅可比更新迭代次数，则仍然采用上一迭代雅可比矩阵 A_{ODE}

Step 3: 计算系统第 $n+1$ 时步第 k 次校正步残差向量：

$$F_{n+1}^k = x_{n+1}^k - x_n - \frac{h}{2} [f(x_{n+1}^k, y_{n+1}^k) + f(x_n, y_n)]$$

由 $-\mathbf{F}_{n+1}^k \approx \mathbf{A}_{yys} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$ 计算差分方程的修正量 $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$ ，更新状态变量

$$\mathbf{x}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{x}_{n+1}^k + \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{k+1}$$

Step 4: 将 \mathbf{x}_{n+1}^{k+1} 带入 $\mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) = 0$ 求解出 \mathbf{y}_{n+1}^{k+1} 。若满足 $\max \{\mathbf{F}_{n+1}^{k+1}\} \leq \xi$ (给定的误差允许值) 时, 则 $n+1$ 步计算迭代收敛。转至 step5; 若不满足, 转到 Step 2 继续迭代, 直到满足收敛标准。

Step 5: $n \leftarrow n+1$, 进入下一时步计算。

数值微分法最核心的部分是扰动操作, 每一个状态变量的扰动过程是相互独立的, 因此整个 \mathbf{A}_{yys} 的形成过程具有并行特征, 对于大规模分布式发电系统稳定性仿真计算所需的 \mathbf{A}_{yys} , 可以采用并行处理机求解, 进而快速获得 \mathbf{A}_{yys} 。

3.3.3 对模型变结构的自适应性分析

采用数值微分法计算雅可比矩阵, 其最大的特点是当仿真过程中模型结构发生变化时, 可以比较容易的实现雅可比矩阵的更新。考虑到分布式发电系统中非连续控制环节的大量存在, 这一特点在分布式发电系统仿真软件的开发中具有独特的优势, 采用这种方法可以在保证仿真速度的同时, 大大简化程序的开发过程。下面以一具体模型进一步说明这一方法的优点。

图 3-2 为典型的分轴结构微型燃气轮机原动系统框图 [85]。图中有三个部分需要通过低值门联结: (1) 速度控制环节; (2) 温度控制环节; (3) 压缩机涡轮系统。当微型燃气轮机运行在正常温度范围内时, 温度控制环节不起作用, 速度控制环节的输出信号 F_D 通过低值门, 即 $V_{ce} = F_D$, 仿真路径为路径 1; 当微型燃气轮机的运行温度过高时, 温度控制环节输出信号 F_{DT} 通过低值门, 此时 $V_{ce} = F_{DT}$, 仿真路径为路径 2。因此仿真过程中需要考虑到两种仿真路径的切换, 也就是需要考虑控制系统的变结构特征。

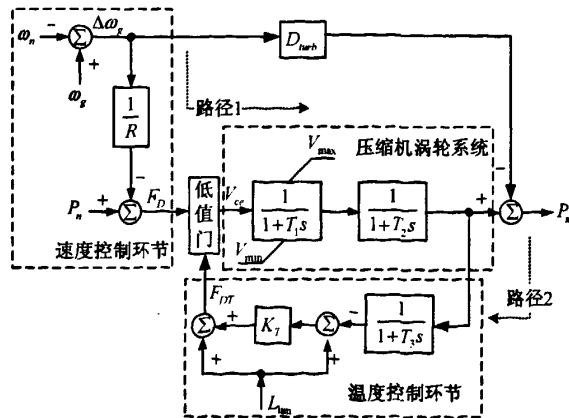


图 3-2 分轴燃气轮机原动系统变结构特点示意图

当仿真路径发生变化时,需要对雅克比矩阵 A_{sys} 进行更新,这种变结构特征将导致雅克比矩阵元素定位和寻址操作的复杂化。采用本文方法,在预测步通过检测低值门信号是否改变,来识别仿真路径是否发生变化,在预测点处可以很容易重新进行状态变量扰动以形成新的雅克比矩阵,这样可以自动计及变结构之后的系统信息,通过校正迭代获得变结构之后的全系统收敛点。

考虑仿真系统变结构情况下,基于数值微分求导的仿真算法分为主要四个子块部分:

子块 1: 预测部分, 主要实现正常积分的初始值计算, 以及仿真路径改变的情况下的检测功能, 输出变结构仿真策略是否启动的信息。如果没有出现仿真路径改变的情况, 则转到下一部分, 如果启动, 则转到变结构仿真策略部分;

子块 2: 伪牛顿算法部分, 这一部分首先检测是否伪牛顿间隔达到, 如果没有达到, 仍然采用上一时步的雅克比矩阵进行校正步迭代, 如果达到更新间隔, 在预测点处采用扰动方法获得 ODE 雅克比矩阵 A_{ODE} , 直接计算校正步所需的迭代雅克比矩阵 A_{sys} , 进入下一模块。

子块 3: 变结构仿真策略, 当检测到启动信息, 在预测点处重新扰动生成雅克比矩阵 A_{sys} , 进入校正环节。

子块 4: 校正步计算, 计算状态变量的残差, 求解状态变量的修正值并更新, 再求解网络电压, 如果迭代收敛, 则转向下一时步仿真。

3.4 分布式发电系统稳定性仿真算法流程

以上讨论了关于分布式发电系统稳定仿真算法的重要组成部分—基于数值微分算法求导的隐式交替求解算法基本原理, 图 3-3 给出的是分布式发电系统稳定性算法的整体性算法流程, 流程图左侧是考虑仿真模型含有变结构特征的情况下下一个时步内计算流程图。

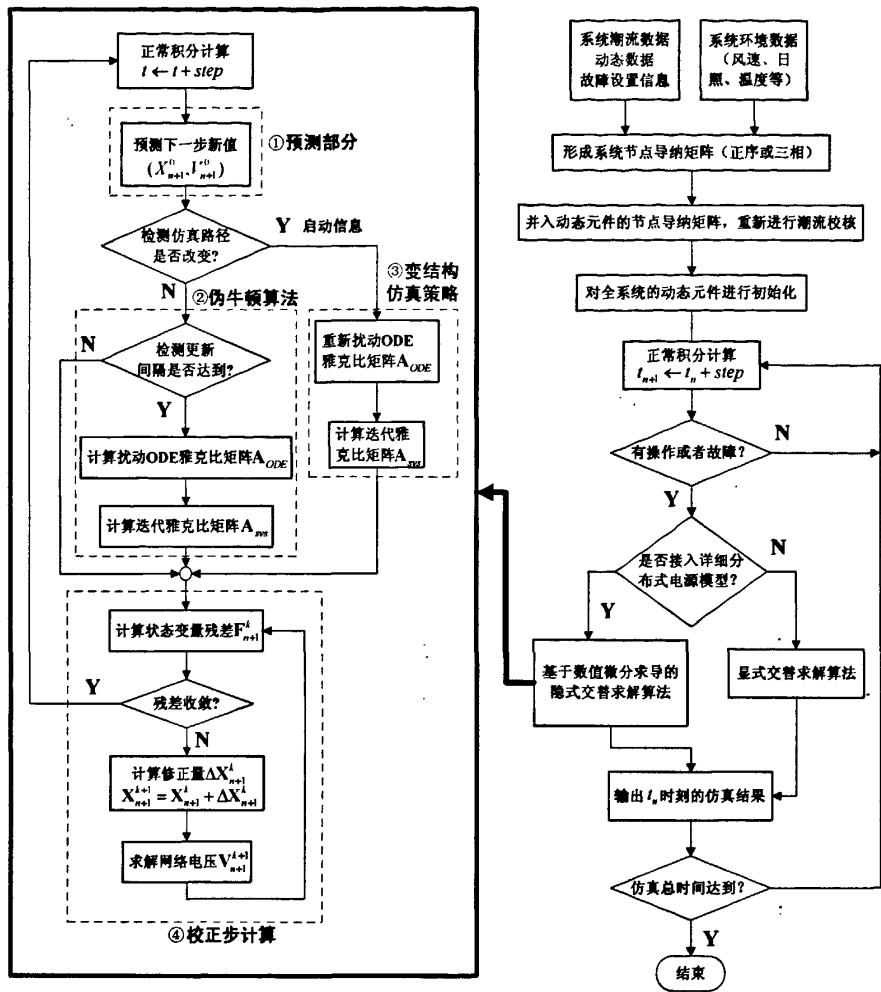


图 3-3 分布式发电系统稳定性算法流程图

3.5 本章小结

本章针对分布式发电系统稳定性仿真算法进行了研究，结合隐式交替求解法、联立求解法的各自优点，采用对自变量进行扰动操作的数值微分法计算系统的雅克比矩阵元素，构造了一种新的隐式交替求解算法。该算法可以自动计及系统模型结构突变时的影响，具有程序开发简单和可靠性高等优点。考虑到分布式发电系统中非连续控制环节的大量存在，这一特点在分布式发电系统仿真软件的开发中具有独特的优势。

第四章 网式链表—双层算法结构在稳定性仿真中的应用

4.1 概述

考虑到稳定性仿真计算的特点,描述整个分布式发电系统的微分方程组的求解并不依赖于数值积分方法的选择,可以采用各种显式、隐式的算法对其进行解算,即动态模型和数值仿真算法具有相互独立性的特点,因此用于实现数值积分方法的数据结构需要具有较强的兼容性,可以处理各种类型数值计算方法的功能函数,并且可以灵活进行切换。同时考虑到可能采用的三相建模的网络结构,系统的导纳矩阵的维数扩大为正序建模的3倍,因此需要考虑采用高效的稀疏矩阵存储技术。本文以“十字链表”结构的稀疏存储结构为基础,提出一种新的“网式链表”存储体系,用于实现显式、隐式算法中导纳矩阵、雅克比矩阵的高效稀疏存储。并且在网式链表的基础之上,设计了一种适合于显式交替求解法、隐式交替求解法、隐式联立求解算法联合使用的双层算法的数据结构,利用显式算法和隐式算法之间的运算功能重叠性特点,将显式算法作为外层算法,而内层为隐式形式积分算法的校正部分(包括联立求解和交替求解),从而达到算法统一设计目的。

4.2 网式链表的基本原理

4.2.1 十字链表稀疏存储原理

稀疏矩阵的十字链表表示法采用多重链表存储稀疏矩阵^[75]。在链表中,每个非零元可用一个含五个域的结点表达,如图4-1(a)所示,其中行(row)、列(col)、值域(val)分别表示该非零元所在行号、列号和该非零元的数值。向右域right用以链接同一行中下一个非零元,同一行的非零元通过right域链接成一个线性链表;向下域down用以链接同一列中下一个非零元,同一列的非零元通过down域链接成一个线性链表。

在这种链接存储结构中,每个三元组节点既处于同一行的单链表中,又处于同一列的单链表中,即处于所在行单链表和列单链表的交点处。整个矩阵构成了一个十字交叉的链表,故称这样的存储结构为十字链表。

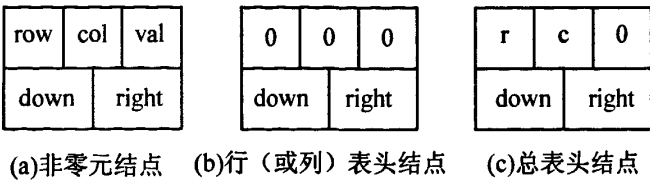


图 4-1 十字链表的节点结构

为了便于对数据进行处理，每行的循环链表有一个表头结点，每一个表头结点的向右指针指向相应行的第一个非零元素结点。每列的循环链表也有一个表头结点，每一个表头结点的向下指针指向对应列的第一个非零元素结点。对应的row、col、val设为0即可。为了节省空间，可以将这两组空表头结点合用。如图4-1（b）所示。

此外，可以利用指针将各个表头结点也链接成一个链表，这样整个表有一个总表头节点，其中相应的row和col对应为全矩阵总行数r和列数c，val设为0即可，如图4-1（c）所示。

利用这个总表头结点的指针就可以访问到此矩阵的所有行和列的头结点，进而可以访问到矩阵中所有的非零元素，如图4-2所示，右图给出左边一个5×5阶稀疏矩阵的十字链表存储结构和描述方法。

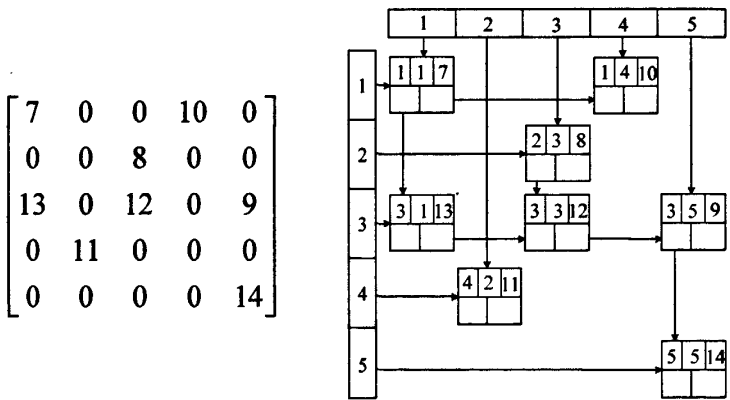


图 4-2 十字链表存储结构图

十字链表从结构上讲具有以下几个主要特点：

- 1) 扩展性强，由行和列的表头结点链接成一个链表是一个单链表，因此其末尾节点可继续挂接新的头结点，用于扩展矩阵的维数，增加新的行或列元素。相比于采用数组方式稀疏存储结构，十字链表稀疏存储结构采用指针操作进行矩阵维数扩展，编程简单，结构清晰。如图 4-3 所示，将上述 5×5 阶稀疏矩阵扩展为 7×7 阶矩阵，对应的十字链表存储结构相应增加 6, 7 行列对应的表头结点，这样就可以扩充新的元素，只要将新元素所在的结点和同行同列相邻元素结点用节点指针链接起来，就可以寻址访问了。

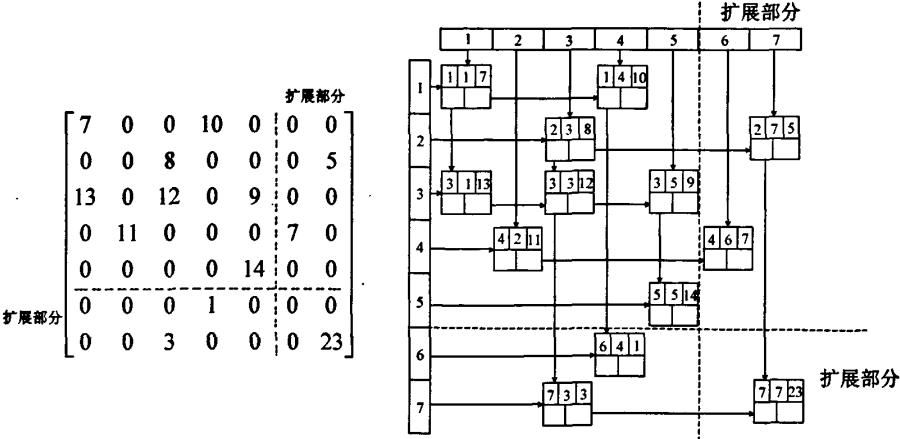


图 4-3 十字链表扩展存储方式

2) 寻址方式多样化, 对于某一行列位置确定的元素, 十字链表结构常规搜索方式是从总表头节点开始, 从行首或列首元素开始的顺序检索, 如图 4-4 中, 对元素 14 进行寻址, 可以采用路径 1, 2 所示方向。考虑到在电力系统计算中很多情况下需要直接存取主对角线元素, 因此部分文献对二维链表进行改进, 增加一个辅助数组, 存放主对角线元素, 如图中按照路径 3 方式搜索元素 14。这样操作不仅能直接存取主对角线元素, 而且可以实现从对角线开始进行向下或向右的检索, 增加了稀疏矩阵检索的灵活性。

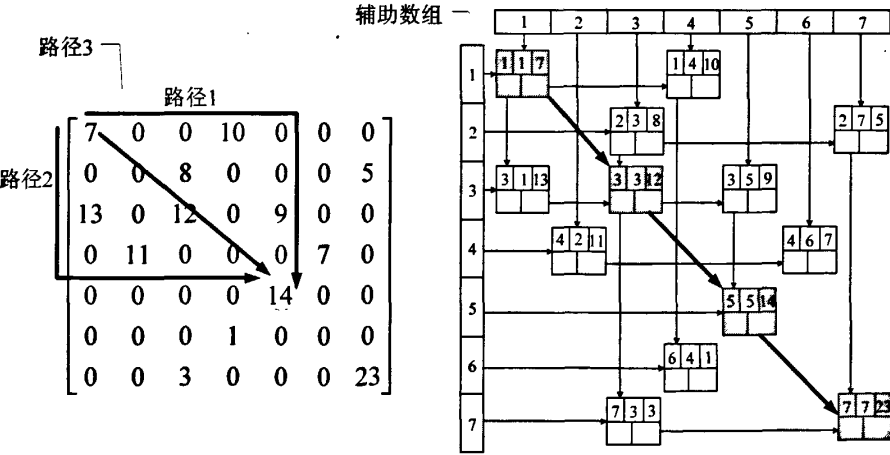


图 4-4 十字链表稀疏存储寻址方式

4.2.2 网式链表的基本特征

由于分布式发电系统仿真计算的特殊性, 需要算法能够兼容正序电网建模、以及三相配电系统建模。若网络采用三相建模方式, 导纳矩阵的维数扩大为正序

系统的3倍, 算法需要考虑采用高效的稀疏矩阵存储技术, 用于存储高维导纳矩阵, 同时稳定性计算中若选用隐式算法, 则还需要考虑存储DAE系统的差分方程对应迭代雅克比矩阵。通过研究分析发现, 十字链表矩阵结构虽然具有可扩展性强, 搜索方式灵活等特点, 但是对于分布式发电系统稳定性仿真中特有的稀疏矩阵结构, 辅助数组的存储没有充分利用DAE系统的雅克比矩阵分块特征。

分布式发电系统稳定性仿真算法中各种数值计算方法计算模型一般均为稀疏矩阵形式, 例如显式交替求解法中节点导纳矩阵(正序或三相形式), 隐式联立求解法中DAE联立代数方程组求解雅克比矩阵, 隐式交替求解法中微分差分方程迭代雅克比矩阵等, 隐式算法中的雅克比矩阵均具有分块特征, 并且这种分块特征和DAE方程中物理元件间的拓扑连接是密切相关的, 物理元件包括发电机、控制器、电力电子装置、分布式电源以及电力网络等。

为了能够利用元件之间的这种拓扑关系, 达到以为一个元件为整体进行快速稀疏填元和寻址目的。本文在十字链表稀疏存储结构上, 基于仿真动态元件拓扑连接关系, 发展了一种新的稀疏存储结构—网式链表稀疏存储结构, 以满足分布式发电系统稳定性仿真计算的需要。“网式链表”由十字链表存储结构和DAE方程中物理元件对象指针共同构成。下面采用图4-3所示分轴燃汽轮机并网系统框图加以详细介绍。

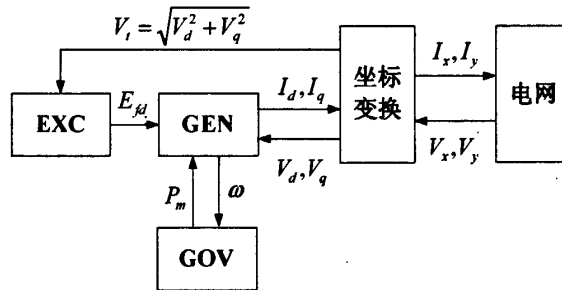


图 4-5 分轴燃汽轮机并网系统

如图4-5所示, 分轴燃汽轮机并网系统由电网(NET)、发电机(GEN)、励磁系统(EXC)和原动机(GOV)组成。发电机组各个动态设备之间通过各种控制信号相连接, 例如励磁系统输入信号为发电机并网母线机端电压 V_t , 输出励磁电压 E_{fd} 至发电机, 原动设备输入信号为发电机角速度 ω , 输出机械功率 P_m 至发电机。

在稳定性仿真计算中, 需要形成数值算法所需各元件对应的雅克比矩阵用于迭代计算, 令 J_{GEN} , J_{GOV} , J_{EXC} , J_{NET} (三相导纳矩阵) 为元件主对角分块雅克比矩阵, 统称为 J_{diag} , 而 J_{GOV_GEN} , J_{GEN_GOV} , J_{EXC_GEN} , J_{GEN_EXC} , J_{EXC_NET} , J_{NET_GEN} , J_{GEN_NET} 为各动态元件、电网之间的耦合部分的非对角分块雅克比矩阵, 统称为 J_{non_diag} , 如果直接采用十字链表存储方式, 对于雅克比矩阵元素的存取和寻址是

低效的，因为相比与电力系统其他领域的矩阵计算对象，上述雅克比矩阵之间通过物理元件之间的输入输出信号联系在一起，物理概念清晰且结构明确。如果之间采用十字链表进行存储操作，仅仅将DAE系统雅克比矩阵视为一般稀疏矩阵，则存储和寻址的效率是低下的。网式链表则利用各个动态设备之间各种控制信号作为控制信号对象指针，和十字链表寻址方式相结合，实现以上所述对角、非对角分块雅克比的快速定位存储。

对于物理元件的对角分块雅克比矩阵，网式链表数据结构在十字链表行和列的表头结点链表中定义了对应分块矩阵行（或列）元素首地址，如图4-6所示。在每一个动态元件类初始化过程中和仿真计算过程中，通过分块矩阵行（或列）元素首地址可以对其进行填元和更新操作，可以将采用十字链表辅助寻址数组加快寻址效率。

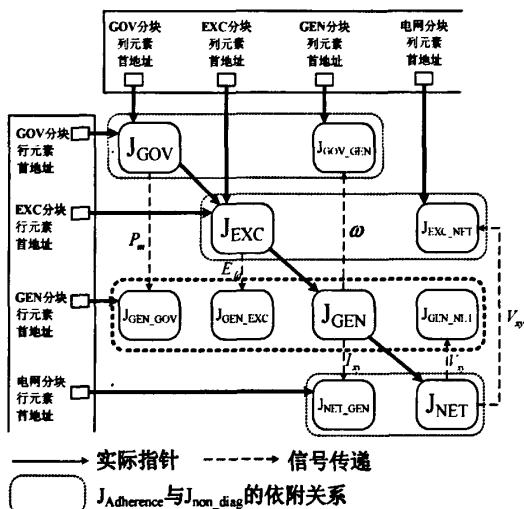


图 4-6 网式链表雅克比矩阵的定义

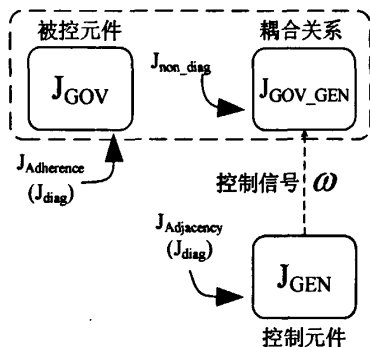


图 4-7 隐式雅克比矩阵的网式链表的组织结构

对于物理元件之间耦合部分的非对角分块雅克比矩阵，需要采用元件之间的输入输出信号进行识别和定位操作。以发电机和原动机为例，发电机输出角速度 ω 对原动机施加控制，从算法结构角度看，控制影响主要体现在角速度 ω 参与 J_{GOV_GEN} 元素的更新操作，可以将发电机类称之为控制元件类，而原动机类成为被控元件类， J_{GEN} 是控制元件类的计算模型变量， J_{GOV} 、 J_{GOV_GEN} 是被控元件类的计算模型变量。将发电机和原动机相关雅克比矩阵排列成图4-7的形式，网式链表存储结构中，角速度 ω 被定义为发电机类输出控制信号指针，原动机类中相应的耦合矩阵 J_{GOV_GEN} 接受该指针信息，用于定位操作和仿真计算信息更新。

输入 J_{GOV_GEN} 的角速度 ω 控制信号指针含有 J_{GOV_GEN} 对应分块矩阵首列地址信息， J_{GOV} 、 J_{GOV_GEN} 同属于原动机类，原动机类确定了 J_{GOV_GEN} 分块矩阵对应首行地址信息，因此可以准确定位 J_{GOV_GEN} 在全矩阵中的位置，在 GOV 初始化过程

中和仿真计算过程中对其进行填元和更新操作。

J_{GEN} 和原动机类对应的 J_{GOV_GEN} 是一种邻接关系,邻接关系体现在控制元件类和被控元件类之间的一一对应关系上,本文将 J_{GEN} 称之为 J_{GOV} 、 J_{GOV_GEN} 的邻接矩阵,简称为 $J_{Adjacency}$ 。而对于 J_{GOV} 、 J_{GOV_GEN} 是一种依附关系,依附关系主要体现在 J_{GOV} 、 J_{GOV_GEN} 同属于原动机类计算模型变量,同时初始化或者更新填元,自动获得 J_{GOV} 所代表的被控元件的行(或者列)的首地址信息。因此本文将 J_{GOV} 称之为 J_{GOV_GEN} 的依附矩阵,简称为 $J_{Adherence}$ 。如图4-7所定义。

对于 $J_{Adjacency}$ 、 $J_{Adherence}$ 在网式链表结构中存在以下两个特征:

- 1) 唯一性, 每一个 J_{non_diag} 仅仅和两个 J_{diag} ($J_{Adherence}$, $J_{Adjacency}$)有关, 其定位填元操作由 $J_{Adherence}$, $J_{Adjacency}$ 共同唯一确定, 这个特点极大的提高了动态元件隐式积分算法建模的效率, 降低了内层算法数据结构设计的难度。
- 2) 组装性, 由于定位操作唯一性的存在, 因此每一个 J_{non_diag} 在整个隐式算法雅克比矩阵中的位置可以自由分配, 不需要按照动态元件之间物理实际连接位置顺序读入, 可以根据当前读入信息, 安插在全雅克比矩阵确定位置上, 动态分配到被控元件内部初始化和更新填元, 并随时和控制元件传入控制信号相配合操作。这种设计方式极大的简化了动态参数文件的设计难度, 整个动态元件的参数录入更加灵活, 可以随时添加或者删除动态模型, 具有良好的组装功能。

图4-6给出的即为图4-5所示的发电机并网系统的全雅克比矩阵的网式链表组织结构图, 从图中可以看出实际十字链表指针结构之上“覆盖”着控制信号对象指针, 类似一张“网”, 对象指针和十字链表指针即构成“网式链表”的基本结构。

4.3 双层算法具体描述

4.3.1 双层算法的内在联系和组织结构分析

采用以上提出的网式链表构造, 本文提出了一种适合于显式和隐式算法联合使用的双层算法数据结构, 显式、隐式算法虽然积分算法原理不同, 但是不同算法之间存在内在联系, 主要有以下几点:

- 1) 显式积分算法(如向前欧拉法、显式四阶龙格-库塔算法等)即可以作为独立积分算法实现对系统刚性程度不高的情况下数值积分算法, 也可以实现预测-校正形式的隐式联立求解法、隐式交替求解法的预测功能。图4-8给出了以向前欧拉法作为预测环节的隐式联立求解法、隐式交替求解法的算法结构。

其中的变量定义与第三章中内容完全相同。

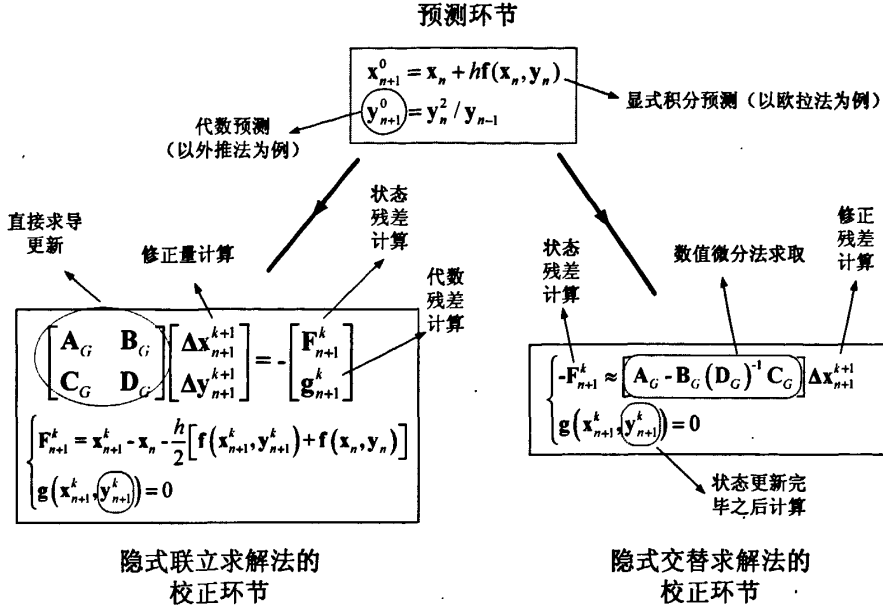


图 4-8 隐式联立求解法、隐式交替求解法算法结构图

- 2) 采用数值微分求导的隐式交替求解法，需要对整个DAE系统进行扰动计算，通过分析可以看出，扰动计算过程可以采用一个时步内的显式交替算法实现（以向前欧拉法为例说明）。如图4-9所示，假设在第 $n+1$ 步初始进行扰动计算，对 \mathbf{x}_{n+1} 施加一个微小扰动 $\xi \mathbf{x}_{n+1}$ ，通过网络迭代求解可以获得代数变量的突变值 \mathbf{y}'_{n+1} （即代数变量的扰动之后的值），进而求得下一时步的增量 $\dot{\mathbf{x}}'_{n+1}$ ，由向前欧拉法可以得到下一时步状态变量 \mathbf{x}'_{n+2} （即下一时步的受扰值），根据欧拉法计算公式：

$$\mathbf{x}_{n+2} = \mathbf{x}_{n+1} + h\dot{\mathbf{x}}_{n+1} = \mathbf{x}_{n+1} + h\mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}) \quad (4-1)$$

式 (4-1) 两边分别对 \mathbf{x}_{n+1} 求导有：

$$\frac{\partial \mathbf{x}_{n+2}}{\partial \mathbf{x}_{n+1}} = \boldsymbol{\varphi}_{ODE} = \mathbf{I} + h \frac{\partial \dot{\mathbf{x}}_{n+1}}{\partial \mathbf{x}_{n+1}} = \mathbf{I} + h \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1})}{\partial \mathbf{x}_{n+1}} = \mathbf{I} + h\mathbf{A}_{ODE} \quad (4-2)$$

\mathbf{A}_{ODE} 的求解可以采用 $\boldsymbol{\varphi}_{ODE}$ 间接获得，即：

$$\mathbf{A}_{ODE} = \frac{1}{h} (\boldsymbol{\varphi}_{ODE} - \mathbf{I}) \quad (4-3)$$

式 (4-3) 表明，除了采用第三章所叙述的通过计算 $\frac{\xi \dot{\mathbf{x}}_{n+1}}{\xi \mathbf{x}_{n+1}}$ 的方式获得 \mathbf{A}_{ODE} 的方法之外，也可以间接求取 \mathbf{A}_{ODE} ，实际上，从完整的积分框架中获取增量 $\dot{\mathbf{x}}'_{n+1}$ 是比较困难的，而下一时步状态变量 \mathbf{x}'_{n+2} 作为仿真算法每一时步的输出相对比较容易获得，因此通过 $\boldsymbol{\varphi}_{ODE}$ 间接获得 \mathbf{A}_{ODE} 计算方法更加有效，且编程较

为简单，而这个方法实现过程完全可以通过显式交替求解框架实现。

由此可以看出，数值微分法的求导过程具有显式积分算法的特征，这样即为显式、隐式算法的数据结构的统一奠定了理论基础。

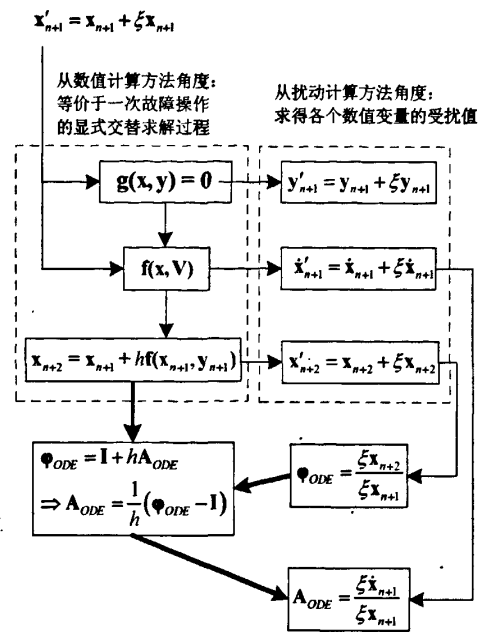


图 4-9 扰动操作和显式积分算法关系图

综合以上两点分析可以看出，显式交替求解法和隐式联立求解法、隐式交替求解法之间的运算功能具有重叠性和复用特点，基于这一原理本文设计出一种双层算法，将 DAE 微分部分采用的显式积分算法作为外层算法，而内层为 DAE 方程采用的隐式梯形算法迭代部分（包括联立求解和交替求解），从而达到算法统一设计目的。外层算法结构不仅仅是单纯显式数值积分计算过程，在统一算法的框架下，它具有以下功能：

- 1) 显式交替求解算法的显式积分功能；
 - 2) 隐式联立求解算法、交替求解算法的状态变量、代数变量预测功能；
 - 3) 隐式联立求解算法、交替求解算法的状态残差计算功能；
 - 4) 数值微分法的状态变量受扰值的计算，以实现扰动操作求导；
- 基于网式链表的结构，内层算法可以实现分块雅克比矩阵定位、填元、更新操作，以实现隐式联立求解法、交替求解法的校正部分雅克比矩阵迭代，残差更新等功能。

4.3.2 显式交替求解法的实现

显式交替求解算法结构相对简单。以第二章中图 2-16 所示的永磁同步直驱电机接电力电子设备接网的分布式发电系统为例说明算法原理。

图中外层算法主要实现如式 (3-4) 所示的分布式发电系统动态元件的显式积分增量计算、以及状态变量计算。 \mathbf{X}_{DG} 、 \mathbf{X}_{GEN} 、 \mathbf{X}_{PE} 为分布式电源、发电机、电力电子控制系统的状态变量， $\dot{\mathbf{X}}_{DG}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_{GEN}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}_{PE}$ 为对应的状态增量。仿真过程并网元件如发电机、PWM 换流器连接到交流母线上，通过网络注入电流和内层算法接口， \mathbf{i}_{NET} 为求解网络电流相量。

内层算法主要实现式 (3-4) 中网络节点电压方程的求解，内层网式链表存储的是系统节点导纳矩阵，即图中的 \mathbf{J}_{NET} ，输出节点电压相量 $\dot{\mathbf{V}}_{NET}$ ， $\dot{\mathbf{V}}_{NET}$ 输入至外层算法中用于状态增量的更新计算。网络方程采用 LU 分解法求解。 \mathbf{J}_{NET} 将完全保留在隐式积分算法双层结构中，体现算法开发过程的统一性。图 4-10 给出了显式交替算法在双层算法中的实现示意图。

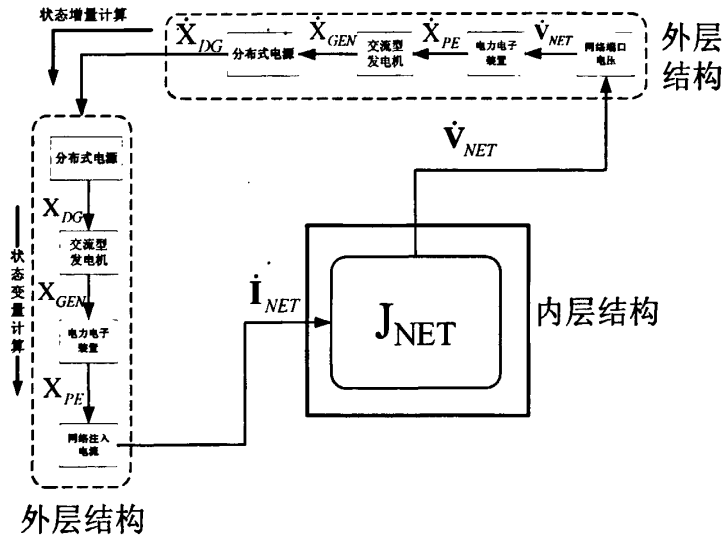


图 4-10 双层算法结构中显式交替求解法示意图

4.3.3 隐式联立求解法的实现

基于双层算法结构的隐式联立求解算法可用图 4-11 加以说明。计算模型外层是和图 4-10 相同的显式积分部分，作为隐式算法预测部分，可以实现式 (3-6) 所示的状态变量、代数变量预测，以及式 (3-5) 所示的残差计算，用于和内层算法迭代计算进行变量交接， $\Delta \mathbf{F}_{DG}$ 、 $\Delta \mathbf{F}_{GEN}$ 、 $\Delta \mathbf{F}_{PE}$ 为分布式电源、发电机、电力电子控制系统的状态残差， $\Delta \mathbf{G}$ 为注入电流残差。

内层算法基于网式链表存储的 DAE 方程雅可比分块矩阵, 以及外层算法输入的残差变量, 对隐式算法的校正步进行修正方程式 (3-7) 迭代计算, 具体展开为式 (4-4) 所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_{DG} & \mathbf{J}_{DG_GEN} & 0 & 0 \\ \mathbf{J}_{GEN_DG} & \mathbf{J}_{GEN} & \mathbf{J}_{GEN_PE} & \mathbf{J}_{GEN_NET} \\ 0 & \mathbf{J}_{PE_GEN} & \mathbf{J}_{PE} & \mathbf{J}_{PE_NET} \\ 0 & 0 & \mathbf{J}_{NET_GEN} & \mathbf{J}_{NET} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{DG} \\ \Delta \mathbf{X}_{GEN} \\ \Delta \mathbf{X}_{PE} \\ \Delta \mathbf{V}_{NET} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{F}_{DG} \\ \Delta \mathbf{F}_{GEN} \\ \Delta \mathbf{F}_{PE} \\ \Delta \mathbf{G}_{NET} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

式中, $\Delta \mathbf{X}_{DG}$ 、 $\Delta \mathbf{X}_{GEN}$ 、 $\Delta \mathbf{X}_{PE}$ 为分布式电源、发电机、电力电子控制系统相对应的修正量, $\Delta \mathbf{V}$ 为电压残差。返回外层算法, 对状态变量和代数变量进行更新, 进行下一步迭代, 若迭代步收敛, 则转至下一时步计算。

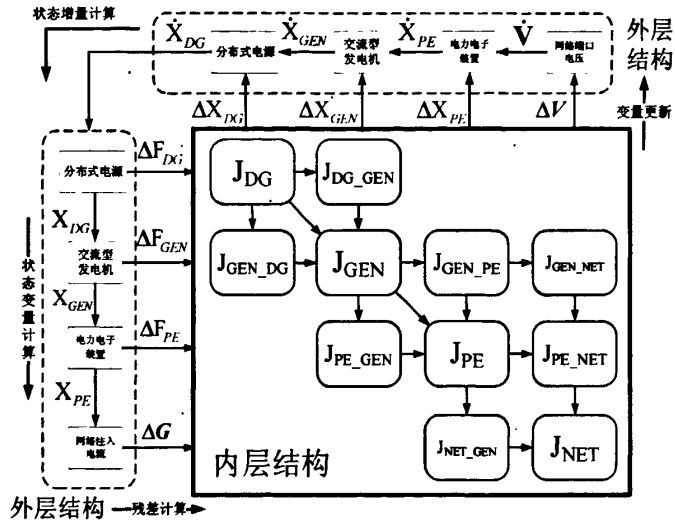


图 4-11 双层算法结构中隐式联立求解法示意图

4.3.4 隐式交替求解法的实现

基于数值微分法的隐式交替求解算法主要分为两个部分, 一部分是数值微分法求导, 另一部分是隐式交替求解, 以下分别加以介绍:

通过外层算法扰动操作和内层网络方程求解共同实现如图 4-9 所示的流程, 外层算法实现状态变量扰动计算、网络注入电流扰动计算, 然后与内层算法的网络方程接口, \mathbf{J}_{NET} 是系统节点导纳矩阵, 计算电压相量扰动值, 然后输入至外层算法, 实现增量变量扰动计算, 扰动计算整个求解过程等价于显式交替求解框架, 因此图 4-10 所示的双层算法的显式交替求解框架保留在图 4-12 中。

隐式交替求解算法的预测部分和联立求解算法相类似, 利用外层显式算法对

状态变量进行预测，外推法进行代数变量预测，计算状态残差，用于和内层算法迭代计算进行变量交接。

隐式交替求解算法的校正部分实现 DAE 降阶系统的修正方程求解，即求解式 (3-12)，内层算法采用网式链表存储的数值微分求导雅克比矩阵，具体展开为式 (4-5) 所示：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_{DG} & \mathbf{A}_{DG_GEN} & 0 \\ \mathbf{A}_{GEN_DG} & \mathbf{A}_{GEN} & \mathbf{A}_{GEN_PE} \\ 0 & \mathbf{A}_{PE_GEN} & \mathbf{A}_{PE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{X}_{DG} \\ \Delta \mathbf{X}_{GEN} \\ \Delta \mathbf{X}_{PE} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{F}_{DG} \\ \Delta \mathbf{F}_{GEN} \\ \Delta \mathbf{F}_{PE} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

式中， $\Delta \mathbf{X}_{DG}$ 、 $\Delta \mathbf{X}_{GEN}$ 、 $\Delta \mathbf{X}_{PE}$ 为分布式电源、发电机、电力电子控制系统相对应的修正量， $\Delta \mathbf{F}_{DG}$ 、 $\Delta \mathbf{F}_{GEN}$ 、 $\Delta \mathbf{F}_{PE}$ 为状态残差。求解修正量之后，返回外层算法，对状态变量进行更新，然后重新计算网路方程的求解，进行下一步迭代，若迭代步收敛，则转至下一时步计算。

与联立求解法不同之处在于，内层采用了两个网式链表分别存储降阶雅克比矩阵 \mathbf{A}_{ODE} 和节点导纳矩阵 \mathbf{J}_{NET} ，两部分参与计算的方式也有所不同， \mathbf{A}_{ODE} 主要用于校正步状态变量牛拉法迭代，而 \mathbf{J}_{NET} 主要参与网络方程的求解，采用的是 LU 分解直接解法。

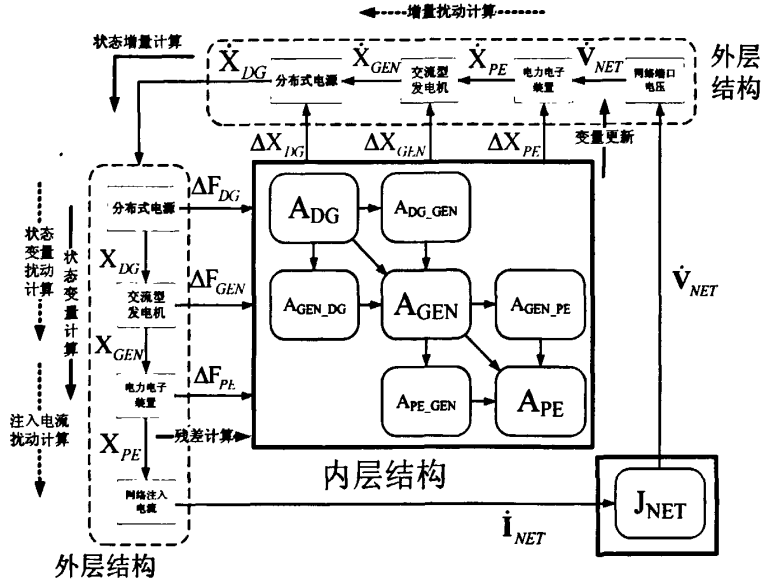


图 4-12 双层算法结构中基于数值微分法求导的隐式交替求解法示意图

4.4 本章小结

本章结合分布式发电系统稳定性仿真数值计算方法的特点，在十字链表结构

基础上,发展了一种网式链表结构,并基于该结构提出了一种网式链表—双层仿真算法(Mesh List-Double Layer Algorithm—MLDLA)结构,该结构是稳定性算法的数学机理在计算机中的具体实现过程。双层框架可以将显式积分算法和隐式积分算法的数据结构统一在一个双层框架中。本章结合显示交替求解法、隐式联立求解法、隐式交替求解法三种算法,对双层算法的功能机理做了详细阐述。

在此框架之内,利用网式链表的特点灵活有效地处理各种动态元件与控制器接口,DAE系统微分方程部分与代数方程部分接口,并可以任意组装拼接基于模块化设计的微分代数系统全雅克比矩阵,这为分布式发电系统软件开发工作中新元件、新模型的加入提供了一个简便的途径。

第五章 分布式发电系统稳定性仿真软件设计

5.1 概述

本章主要从系统框架分析、数据结构实现、面向对象设计^[129]三个方面阐述分布式发电系统稳定性仿真系统的设计方法和实现思路。

系统框架分析是整个软件平台开发的前提,是从整个系统的的技术层次上对程序结构进行合理的划分,这里将分布式发电系统稳定性仿真程序的技术层次划分为如图5-1所示的三个层面,首先是应用功能需求,它主要包括稳定性仿真程序的各种集成技术(高级应用功能),如暂态稳定性分析、频率稳定性分析、小干扰稳定性分析等;其次是仿真计算层面的通用技术,它主要是指分布式发电系统稳定性仿真程序的各种时域求解功能,具体包括正序交直流潮流计算、三相交直流潮流计算、稳定性时域仿真计算等;最底层是单元技术,它主要是指实现各种仿真计算功能的最小化实现技术,包括大型DAE方程组数值积分算法、大型线性稀疏方程组的求解算法、大型非线性稀疏方程组的求解算法、以及大型非线性方程组的求解方法,矩阵的加减乘除操作等。

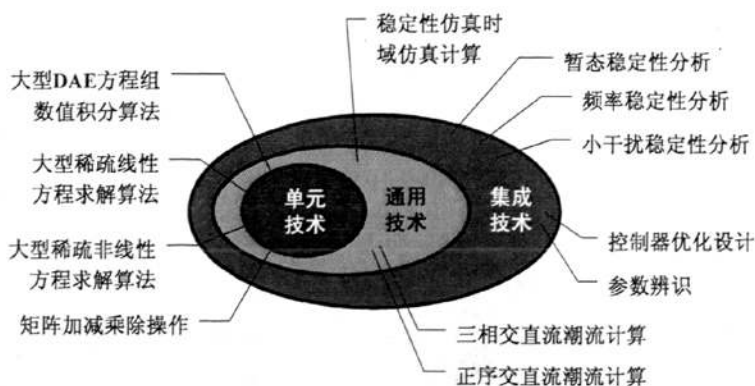


图 5-1 分布式发电系统稳定性分析系统技术层面结构

面向对象程序设计(object-oriented programming, OOP)技术允许程序员用问题本身的术语来描述问题,而不是用具体计算机的术语来描述问题。面向对象软件具有易维护、易扩展等优点,在需求变化时,还具有弹性应对需求和应付市场变化的优势,具有较强的稳定性。面向对象方法学是在面向对象编程技术基础上发展起来的软件开发方法,分布式发电系统稳定性仿真的面向对象方法学设计具体包括面向对象分析、系统设计、对象类设计、面向对象实现四个部分。C++

是一种面向对象程序设计语言，具有封装、继承和多态的特性。正是基于这些特性，分布式发电系统稳定性仿真计算的软件包采用 C++ 语言和面向对象方法加以实现。

本章的主要工作：

- 1) 对分布式发电并网系统进行了详细的面向对象分析，并阐述了系统仿真单元层、网络连接层、系统仿真层的设计过程，提出了在仿真单元层采用“交直流双层母线树”结构对典型分布式发电并网系统进行描述。双层母线树类似于传统电网中发电机及其控制器单元，具有“即插即用”的特性：交直流双层母线树可以将系统模型类集结于交流母线之上，和仿真单元层、网络连接层进行连接，传递动态元件的特征信息，用于系统仿真层的整体算法求解。
- 2) 阐述了分布式发电系统稳定性仿真程序中模型类、功能类的设计方法，以及主要类的结构和功能。

5.2 分布式发电系统面向对象分析

采用面向对象设计的分布式发电系统稳定仿真结构主要包括仿真单元层、网络连接层和系统仿真层；下面介绍具体的设计方法。

5.2.1 仿真单元层设计

文献 [129] 将联接了输电线路、发电机、负荷等电力元件的交流母线看作电力网络组成的基本单元—母线树，电力网络可看作以母线树为基本单元的对象组合。对于分布式发电并网系统而言，既可以通过交流电机直接接入电网，也可以采用各种形式的电力电子装置接入电网，结构灵活多样，原有的母线树概念已不再适用，需要对母线树的概念进行扩展，以适应新研究对象的需要。分布式发电并网系统典型并网方式如第二章所示，根据不同的分布式电源特性，可以采用各种结构实现。

从结构上可以看出，对于直接采用交流电机接网的分布式发电系统，如图 2-57、图 2-58 所示的分轴燃汽轮机并网系统、恒频恒速风力发电系统，仍然可以采用文献 [129] 提出的交流母线树的方式进行描述，其他采用电力电子装置接网的并网系统，需要注意两点不同之处：

- 1) 分布式电源通过电源侧电力电子装置与直流母线相连、或者直接与直流母线相连；
- 2) 考虑到分布式电源的容量限制、以及间歇性和波动性特点，分布式发电并网系统往往需要采用储能元件作为电源补充，而储能元件也一般接于直流母线

端；

这两点不同导致了分布式发电并网系统和传统输电系统并网单元有很大的区别，传统输电系统并网单元元件以并网交流母线为连接点，采用唯一的标识即可对并网单元的所有元件进行定位，这也是原有母线树能够实现并网模型对象组合描述的基本原理，但是分布式电源、电源侧电力电子装置以及储能装置是通过直流母线相连接的，然后再通过逆变装置和交流母线相连，采用直流母线作为连接点的并网元件不能仅靠交流母线进行完全定位，为了完整描述整个并网系统的对象组合，本文提出一种“交流—直流双层母线树”的概念，利用交流母线、直流母线双层结构完整的描述了分布式发电并网系统类对象组合方式。

双层母线树作为分布式发电仿真模型层的基本元素，连接有不同的模型类对象，需要封装双层母线树的特征信息，主要包括：

- 1) 交流母线节点导纳、交流母线所连电力元件位置与连接信息、交流母线节点电压、交流母线节点注入电流等；
- 2) 直流母线所连电力元件位置与连接信息、直流母线节点电压、直流母线两端注入电流等；

图5-2给出了以双层母线树描述的分布式发电并网系统和交流电网之间的连接关系。图中双向箭头代表各个动态元件之间存在的拓扑信息联系，以及在仿真过程中需要交接的信息。仿真求解过程中双层母线树结构作为并网系统元件的集合，具有“即插即用”的特性，对应于分布式发电系统稳定性仿真中的微分方程部分，而交流配电网络对应于代数方程部分，可以采用交替求解法或者联立求解法进行时域仿真。整个分布式发电系统划分为并网系统和交流配电系统两大部分，仿真程序开发过程更加清晰，维护和模型扩展也更加容易。

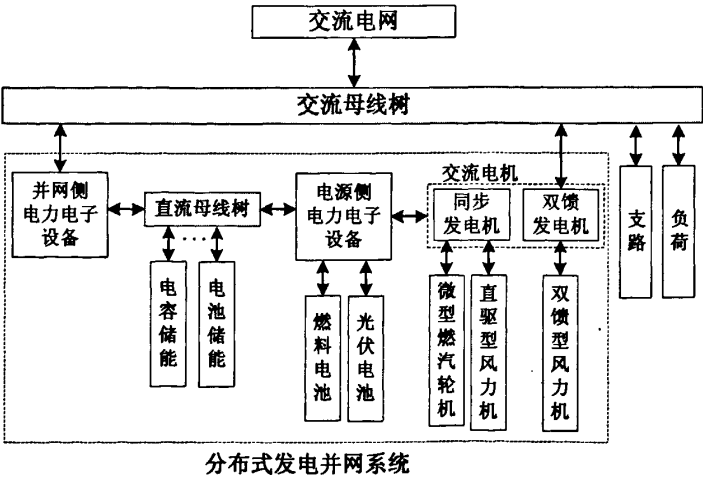


图 5-2 并网发电系统双层母线树和网络之间的关系

与图5-3相对应，母线树的结构如图5-4所示。

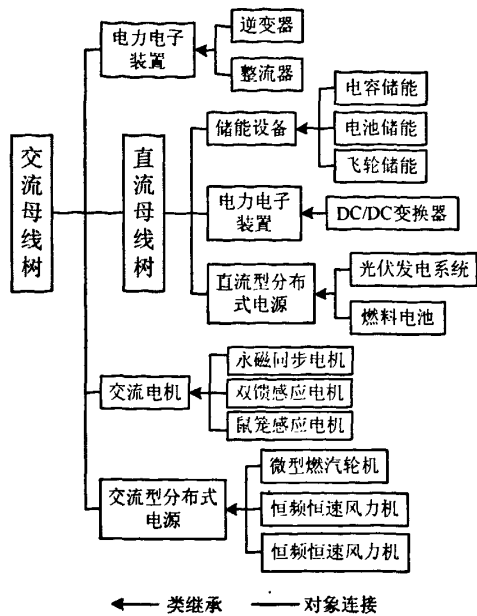


图 5-3 双层母线树结构图

5.2.2 网络连接层设计

与传统输电系统暂态仿真计算不同，分布式发电系统稳定性仿真计算既需要对xy0同步坐标系下电网模型进行模拟，也需要对abc坐标系下电网模型进行模拟，因此需要进行两种网络模型抽象工作，网络连接层就实现了这一目的。分布式发电系统网络连接层的输入信息为故障设置操作信息、双层母线树位置信息（交流母线树、直流母线树的模型类信息）、与支路，负荷连接信息等；在仿真单元层和网络连接层之间存在一个接口标识，其功能是为了对并网元件接入不同坐标系下的网络模型进行识别，以输出不同形式的输入电流信息传入系统仿真层用于计算，对于xy0坐标系节点导纳矩阵，与之相对应输出正序注入电流信息，对于abc坐标系节点导纳矩阵，与之相对应输出为三相注入电流信息，由于012坐标系下的网络元件模型可以通过对称分量法变换到abc坐标系下进行求解，因此不再做单独处理。网络连接层输出信息为分布式发电系统节点导纳矩阵，包括正序节点导纳矩阵，三相节点导纳矩阵。用于系统仿真层仿真计算。

为了不失去一般性，在具体介绍网络连接层的功能结构时，不再特别指出网络具体采用xy0同步坐标系下还是abc坐标系下电网模型，两者仅输入信息不同，结构完全相同。如图5-4所示，输入信息由两部分组成，一部分是从文本文件或数据库读取的支路参数信息、以及静态负荷参数信息，并入节点导纳矩阵之中形成潮流导纳矩阵。另外一部分是双层母线树特征信息，对于网络连接层而言需要

提取的信息是母线树所连电力元件的恒定导纳参数信息，恒定导纳参数作为修正元素可并入系统节点导纳矩阵之中形成真正用于稳定性仿真计算的网路节点导纳矩阵。系统节点导纳矩阵采用稀疏矩阵存储结构存储，为导纳矩阵的头指针地址。也即为网络连接层输出。

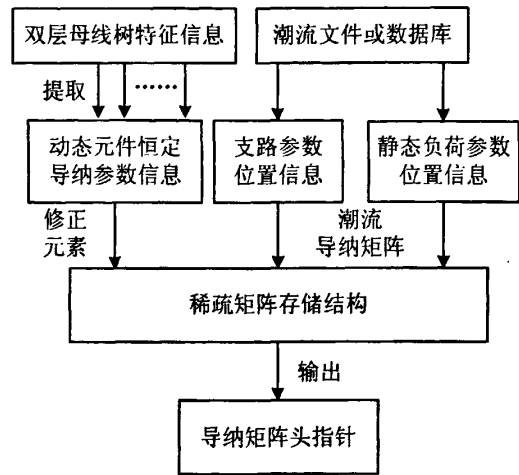


图 5-4 网络连接层功能结构图

5.2.3 系统仿真层设计

分布式发电系统系统仿真层实现全网稳定性计算功能，其结构功能图如图 5-5 所示。输入信息为网络连接层输出的正序、三相节点导纳矩阵、以及仿真单

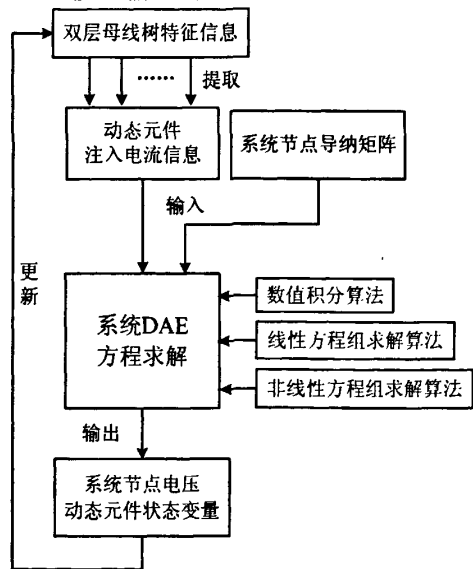


图 5-5 系统仿真层功能结构图

元层的双层母线树交流节点注入电流信息。仿真层核心是系统DAE方程的求解，结合各种功能模块如数值积分算法、线性方程组求解算法、非线性方程组求解算法等实现一个步长内系统状态变量、代数变量的求解。

系统仿真层的主要输出信息是系统节点电压和动态元件相对应的状态变量，输出信息将会作为反馈信息返回仿真单元层双层母线树，更新母线树特征信息（交流母线节点电压、直流母线电压和电功率等）以及所连动态元件的内部变量值，以启动下一步长计算。总结以上的三层结构描述，系统层次结构图如图5-6所示。

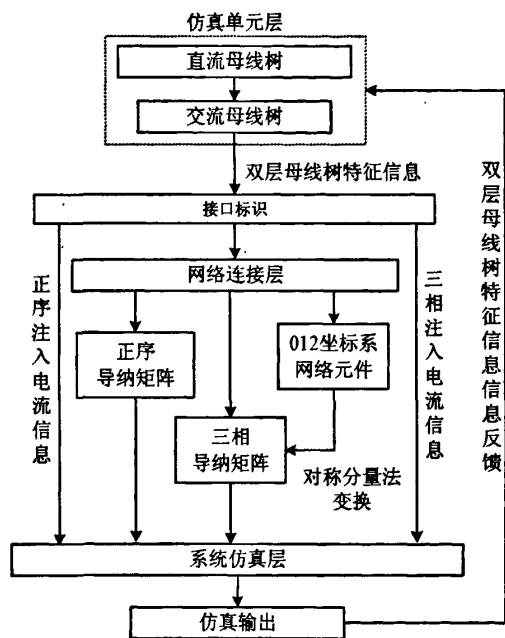


图 5-6 分布式发电系统稳定性仿真系统层次结构图

5.3 分布式发电系统模型类设计

分布式发电系统的主要的类单元之一是分布式发电系统并网单元类（C_GridConnected_Unit），主要由三层类构成：

- 1) 通用元件类，即组成分布式发电系统中各种分布式集成类的基本元件类，包括同步电机类、异步电机类、电力电子类、还有各种具有自身特有的静态或者动态特性的分布式电源类，这些类自成体系，各自之间没有相互的直接联系，由它们继续集结，可以形成更高层次的分布式发电系统模型类—通用单元类、集成单元类。

- 2) 通用单元类, 是若干个类的集结, 具有特定组织结构的某种分布式发电并网系统由若干个相互独立的通用元件类组成, 例如单轴燃汽轮机并网系统单元类是采用单轴燃汽轮机原动机类、发电机类、电力电子类组成。不同的通用单元类可能包含相同的通用元件类, 单元类与单元类之间具有复用性。
- 3) 集成单元类, 是分布式发电系统中最大的单元组合, 主要分为分布式电源单元类、分布式储能单元类, 由它们组成了分布式发电系统并网单元类, 也就是稳定性仿真程序中核心建模部分。

以上三种类结构具有由层层包含的关系, 集成单元类包含通用单元类, 通用单元类又包含通用元件类, 以下图 5-7 给出相应的类结构示意, 包括各种基类或派生类关系说明, 虚框表示包含关系。

5.3.1 分布式交流电机类

交流电机是分布式发电系统主要的并网元件之一, 按照分布式发电系统稳定性仿真程序的系统仿真层的设计思想, 并网元件需要通过接口标识进行类型转换, 以保证并网元件可以与 xy0 坐标系、abc 坐标系的电网模型进行接口, 相对应的交流电机作为最基本的通用元件类, 这里称之为分布式电机类 (*C_Distributed_Machine_Unit*), 其派生类也分为两种形式, 以下是具体的基类和派生类说明:

- 同步发电机基类 (*CGenBas*): 派生子类分为两大类, 其中适合于 xy0 坐标系电网接口电机类为二阶经典发电机子类 (*CGenCENCLS*)、双轴模型发电机子类 (*CGenFourOrder*)、双轴模型发电机子类、6 阶圆形隐极式汽轮机模型子类 (*CGenGENROU*, 兼容 5 阶凸极式水轮机模型)、适合于 abc 坐标系电网接口模型电机类 *CGenCENCLSTPM*、*CGenFourOrderTPM*、*CGenGENROUTPM*, *CGenGENROUTPM*, 与第一类相对应, TPM 代表三相模型 (*Three Phase Model*);
- 异步电机基类 (*CMotBas*): 派生子类也同样分为两大类, 其中适合于 xy0 坐标系电网接口电机类为 3 阶鼠笼型异步发电机子类 (*CMotCIMTR1*)、3 阶鼠笼型异步电动机子类 (*CMotCIMTR4*)、风力机组接入异步发电机子类 (*CMoWindCIMTR1*)、适合于 abc 坐标系电网接口模型电机类 *CMotCIMTR1TPM*、*CMotCIMTR4TPM*、*CMoWindCIMTR1TPM*, 与第一类相对应, TPM 代表三相模型 (*Three Phase Model*);

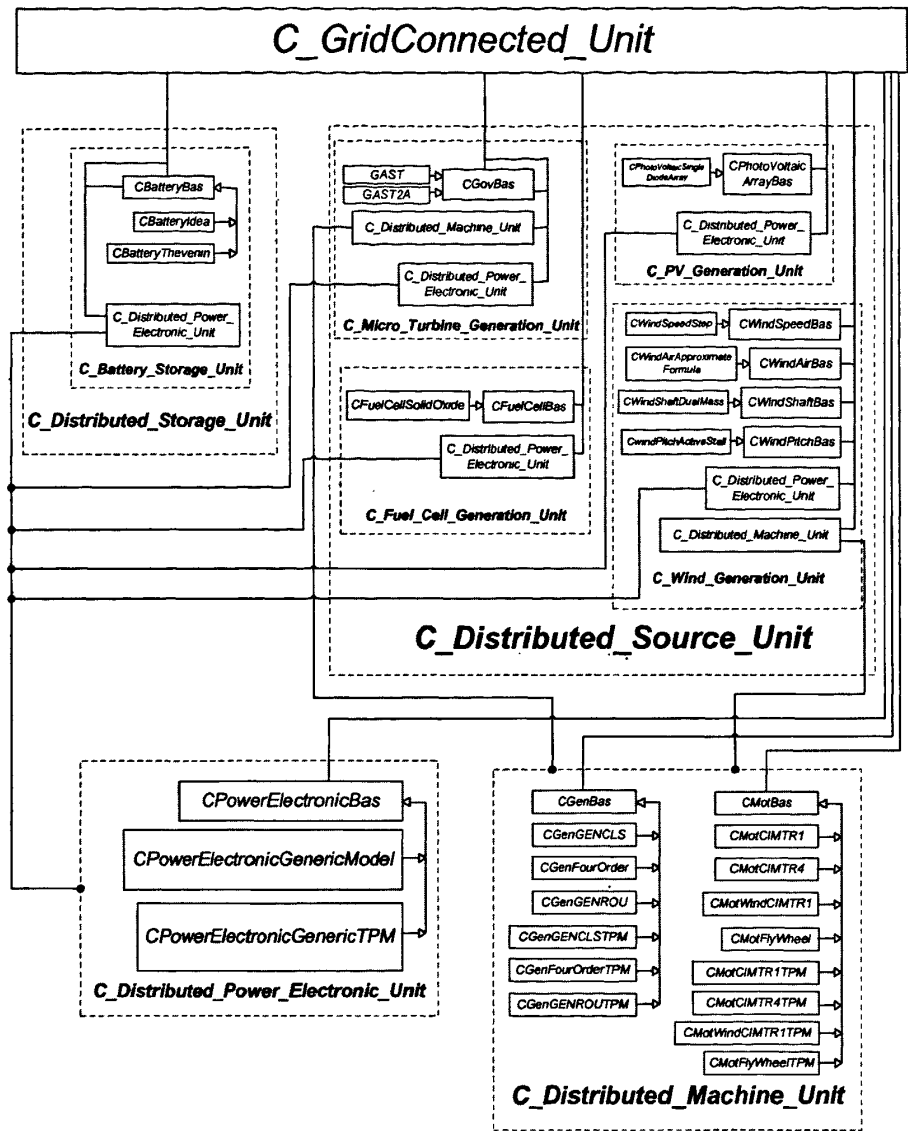


图 5-7 分布式发电并网系统并网单元类结构

5.3.2 分布式电力电子类

电力电子类是另一种分布式发电系统中主要的并网元件，同样作为最基本的通用元件类，这里称之为分布式电力电子类（*C_Distributed_Power_Electronic_Unit*），其派生类也分为两种形式，以下是具体的基类和派生类说明：

电力电子装置基类（*CPowerElectronicBas*），电力电子装置采用通用化准稳态模型设计，派生子类分为两大类，其中适合于xy0坐标系电网接口的通用化子类（*CPowerElectronicGenericModel*）、适合于abc坐标系电网接口通用化子类

(*CPowerElectronicTPM*)。

5.3.3 分布式电源单元类

分布式电源单元类 (*C_Distributed_Source_Unit*) 主要是由各种典型的分布式电源及其控制系统基类以及派生类组成, 主要分为三种类型:

1) 通用元件类

某些分布式电源本身就是交流电机上的控制装置, 具体定义如下:

- 原动机和调速器基类 (*CGovBas*), 派生分轴燃汽轮机类 (*CGAST*)、单轴燃汽轮机类 (*CGAST2A*), 它们是微型燃汽轮机并网系统重要组成部分。

某些分布式电源本身具有特殊的动态或者静态特性, 并采用电力电子装置并入网络, 类比于交流电机上的控制装置, 这种分布式电源可以视为电力电子装置上的挂接的控制装置模型。具体定义如下:

- 燃料电池基类 (*CFuelCellBas*): 派生固体氧化物燃料电池子类 (*CFuelCellSolidOxide*), 是燃料电池并网系统重要组成部分。
- 光伏阵列基类 (*CPhotoVoltaicArrayBas*): 派生单二极管型光伏阵列子类 (*CPhotoVoltaicSingleDiodeArray*), 是光伏阵列并网系统重要组成部分。

某些分布式电源结构更加复杂, 由单一通用元件类无法完整描述, 需要采用多个通用元件类组合进行描述, 例如风力机单元, 主要由四个对象类构成: 空气动力学基类、轴系基类、桨矩控制基类、风速模拟基类, 根据派生子类的不同, 可以组合出不同类型的风力机模型, 具体定义如下:

风力发电系统单元 (*C_Wind_Generation_Unit*):

- 风速模拟基类 (*CWindSpeedBas*): 派生阶跃风速类 (*CWindSpeedStep*)
- 空气动力学部分基类 (*CWindAirBas*): 派生恒频恒速风力机组近似计算公式类 (*CWindAirApproximateFormula*)
- 轴系部分基类 (*CWindShaftBas*): 派生双质块模型类 (*CWindShaftDualMass*)
- 桨矩控制基类 (*CWindPitchBas*): 派生主动失速控制类 (*CwindPitchActiveStall*)

由以上四个基类派生的子类可以组成恒频恒速风力机模型, 它恒频恒速风力发电并网系统重要组成部分。

2) 通用单元类

由以上的通用元件类、结合交流电机单元通用元件类、电力电子单元通用元件类即可组成典型分布式电源通用单元类, 如微型燃汽轮机发电机并网系统

单元类 (*C_Micro_Turbine_Generation_Unit*)、风力发电并网系统单元类 (*C_Wind_Generation_Unit*)、燃料电池并网系统单元类 (*C_Fuel_Cell_Generation_Unit*)、光伏发电并网系统单元类 (*C_PV_Generation_Unit*), 并且根据并网通用元件类的选取不同, 各种并网系统可以与不同网络模型灵活接口。

5.3.4 分布式储能单元类

分布式储能单元类 (*C_Distributed_Storage_Unit*) 主要是由各种典型的分布式储能元件通用类、或者由若干通用元件类 (如交流电机, 电力电子) 构成的通用单元类来描述, 与分布式电源单元类在结构上非常相似, 主要分为两种类型:

1) 通用元件类

某些分布式储能元件类直接挂载在电力电子装置之上并网, 比于交流电机上的控制装置, 这种分布式电源也可以视为电力电子装置上的挂载的控制装置类型。具体定义如下:

- 蓄电池基类 (CBatteryBas): 派生理想蓄电池类 (CBatteryIdea), 实现恒定直流电压源模型的理想蓄电池模型, Thevenin 等效电路模型类 (CBatteryThevenin)。

2) 通用单元类

由通用元件类、结合交流电机单元通用元件类、电力电子单元通用元件类即可组成典型分布式储能元件通用单元类, 如蓄电池并网系统单元类 (*C_Battery_Storage_Unit*), 根据并网通用元件类的选取不同, 各种并网系统可以与不同网络模型灵活接口。

5.4 分布式发电系统功能类设计

功能类是分布式发电系统稳定性分析程序面向对象设计的一组类的总称, 主要实现稳定性计算流程, 具体由数据读入, 仿真调度, 数据集成, 系统求解, 数据输出等功能组成。图 5-8 给出了功能类的组织结构图。

1) 系统信息处理类

系统信息处理类主要完成数据输入输出功能:

- 数据读入类: 从文本文件或者数据库导入两种信息, 一种是潮流计算程序获得系统运行数据, 另一种是分布式电源、储能装置、电力电子装置动态参数。
- 读入功能类: 主要实现字符串检索、查找和转换的功能。
- 输出类: 收集仿真单元类输出的信息, 用于打印和形成报表、曲线等形式。

2) 仿真求解类

在分布式发电系统稳定仿真分析中,仿真求解类用于读入系统参数(网络元件信息和运行信息等)、分布式发电并网系统单元内部通用元件类的结构矩阵运算、系统正序导纳矩阵或三相导纳矩阵LU三角分解操作、网式链表-双层算法的稀疏存储、代数方程组稀疏求解等工作。具体包括以下几种主要类结构:

- **矩阵运算类:**通用元件类在模型初始化或者仿真过程中需要进行某些小规模矩阵的加、减、乘、除求解运算,此外,012坐标系的元件转换到abc坐标系下需要采用对称分量矩阵变换,这些均可在矩阵运算类中加以实现。
- **稀疏矩阵类:**本文采用网式链表稀疏存储结构作为系统导纳矩阵、迭代雅可比矩阵的存储结构,因此稀疏矩阵类在十字链表类的基础上派生,完成系统导纳矩阵的存储和LU分解运算。
- **方程求解类:**主要完成显式交替求解法中系统节点电压方程求解、隐式交替求解法中修正残差方程的求解运算。

3) 仿真集成类

仿真集成类用于分布式发电系统模型类数据、系统信息处理类、仿真求解类方法进行集成,实现数学模型和计算仿真模型的对应。主要包括以下几个类结构:

- **系统求解类:**主要采用仿真求解类功能实现计算模型求解,例如某一具体数值算法中的微分方程的求解,代数方程求解等功能,同时也包括故障和操作的设置等功能。
- **数据集成类:**主要采用系统信息处理类功能实现实现稳态、动态数据匹配,各种动态元件在仿真过程中的数据汇集和分配等功能。
- **仿真实现类:**是数据集成类和系统求解类的集成,实现对以上阐述的分布式发电系统模型类和各种功能类的封装,通过功能类对象对模型类对象的作用,抽象出数值仿真系统。承担了算法的整体调度功能,涵盖了各种数值算法的实现,例如显式交替求解法,隐式交替求解法等,仿真类是系统仿真层的核类。

为了适应分布式发电系统模型多样性和结构多样性的特点,分布式发电系统模型类、功能类是开放设计的,模型类通用元件模型可以自由的加入和完善,以上提到三种分布式发电系统功能类的设计相互耦合度较小,可以独立开发并扩展,系统信息处理类、仿真求解类是基础功能类,并且是可以自由扩展,例如可以采用其他形式的稀疏存储结构,或者新的数值积分方法,代数方程的求解方法等,,减小了代码的开发量和维护量,仿真集成类是综合功能类,它也是可以扩展的,例如可以考虑并行环境下分布式发电系统稳定性仿真计算功能的扩展,模型类、基础功能类、综合功能类的这种良好的扩展性,可以使得软件按照设计目标的类

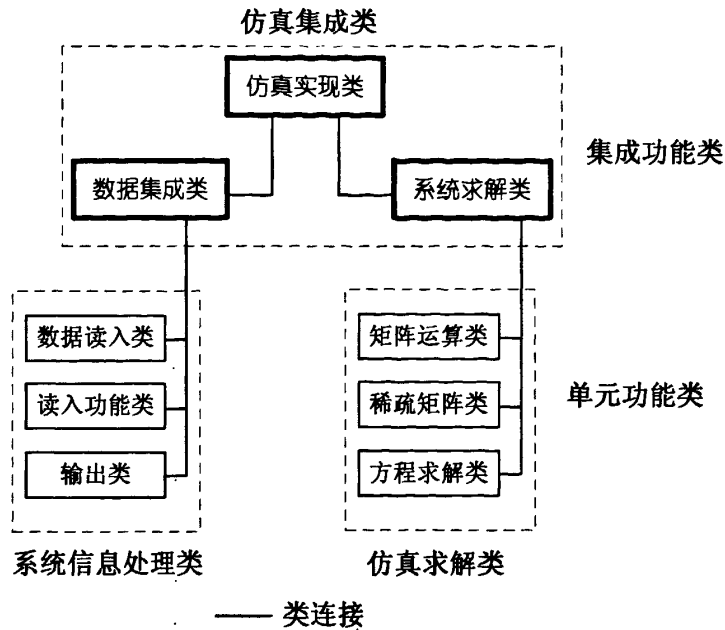


图 5-8 分布式发电并网系统功能类结构

别，将各种类结构重新集成可实现新的目标，例如和电磁暂态仿真软件包相结合，开发分布式发电系统全过程仿真程序，那么原有的模型类、功能类可以被继续复用，使软件工程成为可继承的事件，有助于提高软件开发效率。

5.5 分布式发电系统稳定性仿真程序实现

以上提出的系统仿真单元层、网络连接层、系统仿真层、以及模型类和功能类的设计方法最终体现在具体的软件实现上，本文基于以上面向对象设计思路，开发出一套可扩展的分布式发电系统稳定性仿真程序（Extended Transient Stability Simulation Program for Distributed Generation System - 简称 ESPDG），从结构上将主要分为四个部分：数据输入模块、程序核心模块、数据输出显示模块、用户接口模块（扩展部分）。程序基本结构框架如图 5-9 所示。

1) 数据输入模块

数据输入模块主要实现系统潮流数据（稳态信息）、系统元件动态参数、仿真过程控制信息、输出设置等信息的输入功能。

- 系统潮流数据包括正序交直流潮流计算程序输出结果，三相交直流潮流计算程序输出结果，用于获得含有电力电子器件的分布式发电系统稳态运行点，进行动态元件的初始化工作。

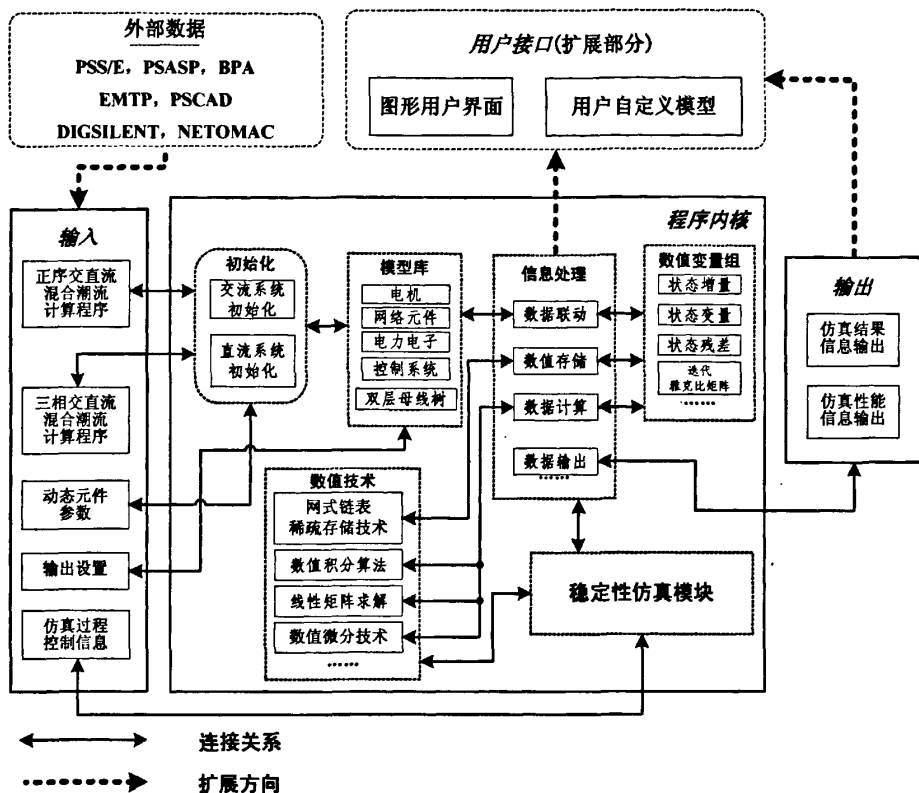


图 5-9 分布式发电系统稳定性仿真计算程序基本结构

- 系统元件动态参数包括大量电气系统控制器、分布式电源控制器的参数，以及动态元件的结构参数（发电机的暂态电抗、次暂态电抗、时间常数等），用于动态元件初始化以及稳定性时域仿真的数值计算过程。
- 仿真过程控制信息定义了两部分的内容：一部分是各种故障类型的设置，包括正序网络，三相网络中的对称短路、断线故障，不对称短路、断线故障，以及各种参考值的跃变操作、负荷的投切，分布式电源的投切等操作。另外一部分是数值积分方法的一些重要属性指标，例如采用的数值计算方法类型，状态变量的残差收敛精度，代数变量的残差收敛精度，迭代次数，伪牛顿算法的更新间隔次数等，以保证数值计算过程顺利进行。
- 输出设置功能是方便用户查看需要的仿真数据结果，可以灵活定位选择输出的各种动态元件的状态变量、代数变量的信息。

将这些信息综合之后通过程序的输入模块，传达到程序核心模块进行下一步计算。同时考虑到和其他商业软件的兼容性和信息交互的可能，数据输入模块应具备兼容第三方软件数据文件格式的能力，这是本程序发展的一部分，目前可以兼容电力系统仿真软件 PSS/ETM (Power System Simulator for Engineering) 的 PTI

数据文件格式, PSS/ETM 元件动态参数 DYN 数据文件格式。

2) 程序核心模块

这一部分是整个程序的主体,所有的内部计算过程均在这一部分实现,主要由初始化,模型库,数值变量组,信息处理,数值技术以及稳定性仿真模块几个部分组成。

- 初始化部分是利用输入模块中潮流计算结果(电压,功率等一系列运行变量值)、动态元件参数信息对程序内部的动态模型进行初始化的过程,可以分别对分布式发电系统的发电机、电力电子装置、分布式电源控制系统等内部变量进行初始化操作,为进一步稳定性仿真计算作数据准备;
- 模型库中包含了分布式发电系统稳定性分析所需要的典型动态元件(如电机和控制系统模型),同时也开发若干种典型的分布式电源模型、电力电子控制系统,同时为了适应低压配电系统的特殊性,扩展了接网设备的三相模型,网络元件模型涵盖了正序参数模型、120 参数模型、abc 相参数模型;
- 数值变量组是和模型库所对应的一组单元,将模型库的动态元件的物理变量和数值变量组的数值变量采用双指针联动定义,基于该操作无论是在模型库中更新物理变量,还是调用积分算法更新数值变量,两者完全同步,任何时步点上,无论从模型层面还是数值算法层面,调用变量变得方便可靠,两者有机统一,互不干扰,也不存在联动变量更新问题,这样就实现了模型初始化、算法和输出设计的统一过程。这一过程如图 5-10 所示。

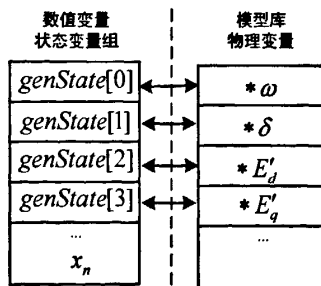


图 5-10 指针联动概念

指针联动技术目的是使得编程思路和设计过程简单化,可以在不增加新的存储空间的前提下,实现模型初始化、外层算法和输出模块编程过程隔离,但是在物理存储单元上又是对同一对象进行操作。

- 数值技术库主要包括数值积分算法和网式链表稀疏存储技术,数值积分算法即实现稳定性仿真求解模式中显式交替求解法和隐式交替求解法中所需要使用到的欧拉法、2 阶, 3 阶, 4 阶龙格-库塔算法,以及在隐式交替求解法和网络求解中需要使用到的线性矩阵 LU 分解求解技术,同时采用基于十字

链表存储技术发展的网式链表方法对系统矩阵进行高效存储;

- 稳定性仿真模块, 该模块主要实现分布式发电系统稳定性仿真的总流程, 读入仿真过程控制信息文件, 设置操作和故障, 调用数值积分算法和稀疏存储函数进行数值变量求解, 可以处理各种类型的故障和操作;
- 信息处理模块是连接初始化、模型库、数值技术、数值变量组、稳定性仿真模块的中间环节, 主要起到是数据联动、数据输出、数值计算、数据存储的作用, 将环节之间数据信息联合起来, 处理完之后的信息可以提供数据输出模块加以展示。

3) 数据输出显示模块

数据输出模块是程序的出口, 主要负责程序结果的输出、显示与处理等功能。程序输出信息主要包括仿真结果显示, 仿真过程信息显示, 仿真结果给出了在设定扰动下分布式电源以及控制系统、电气系统及其控制环节的动态响应情况, 仿真过程信息则给出了仿真计算过程中迭代次数, 最大残差和计算时间等重要属性。

4) 用户接口模块(扩展部分)

作为一个完整的计算程序应具有良好的用户接口模块, 目前数据输入模块基于读取数据文件的形式, 应向图形用户接口(graphical user interface, GUI)进行扩展, 采用 GUI 简化了用户的建模过程, 缩短了建模时间, 使仿真过程更加形象、直观, 更适宜工程技术人员的使用, 同时考虑到分布式电源设备的多样性特点, 应考虑采用用户自定义方式对系统模型进行扩展, 相对于开发的固定形式的“内置模型”, 用户自定义方式更加灵活有效。

5.6 本章小结

本章重点阐述了分布式发电系统稳定性仿真程序面向对象分析方法, 讨论了系统仿真单元层、网络连接层、系统仿真层的设计过程, 提出了在仿真单元层中采用“交直流双层母线树”结构对并网系统进行描述。并网系统类似于传统电网中发电机及其控制器单元, 具有“即插即用”的特性: 双层母线树和仿真单元层、网络连接层进行连接, 传递动态元件的特征信息, 用于系统仿真层的整体算法求解。阐述了分布式发电系统稳定性仿真程序中模型类、功能类的设计方法, 以及主要类的结构和功能。

基于面向对象设计思路, 开发出一套可扩展的分布式发电系统稳定性仿真程序, 对其数据输入模块、程序核心模块、数据输出显示模块、用户接口模块(扩展部分)进行了描述。

第六章 仿真算例分析

6.1 验证平台

本节采用C++语言编程，计算平台主机为Inter Pentium PD内核处理器，主频为 2.99Hz，0.99GB内存。以 400V低压微网benchmark算例^[130]的数据作为本文测试算例的基础，该测试系统是基于欧盟第五框架计划（1998-2002）项目^[131]“The Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids activity”提出的一个详细的低压配电系统平台，对其部分负荷、线路数据进行了一定的改造，以适应本文开发分布式发电系统稳定性仿真软件算法的验证工作。

6.2 逆变器主导型分布式发电系统稳定性仿真算法测试

电力系统仿真软件DIgSILENT (DIgital SImuLation and Electrical NeTwok)^[66]全面引入面向对象编程技术和数据库概念，允许用户在单一的数据库中创建详尽的电力系统元件模型(包括稳态、时域、频域等计算用的一系列参数)，成为电力系统仿真程序新一代的代表。DIgSILENT 可以描述复杂的单相和三相AC系统及各种交直流混合系统，提供了丰富的三相建模形式稳定性仿真元件模型库，可以选择的数值积分方法有显式龙格-库塔法，或隐式交替求解和联立求解算法，计算过程中可采用固定步长和变步长策略。本算例中电力电子控制系统均可采用DIgSILENT模型库实现，因此选用DIgSILENT仿真软件搭建算例仿真结果作为参考验证数据。

6.2.1 算例系统描述

系统接线图参见附录B图B-1，1号母线为主网接入点，母线11、17、18分别接入受控交流电压源，该交流电压源采用恒定直流电压源接逆变器组成。三相线路参数、三相潮流、逆变器动态参数请参见附录B表B-1~B-5。

表 6-1 对称短路故障、不对称短路故障试验数据表

测试算法1	逆变器主导型分布式发电系统稳定性仿真算法 (四阶显式R-K算法)
-------	-------------------------------------

校核软件	商业版DIgSILENT 13.0
测试故障描述1	0.1s时刻在12-13号线路间靠近12号母线处发生三相金属性短路接地故障，0.2s故障清除；
测试故障描述2	0.1s时刻在12-13号线路间靠近12号母线处发生A相单相金属性短路接地故障，0.2s故障清除；
测试故障描述3	0.1s时刻在12-13号线路间靠近12号母线处发生AB相两相金属性短路接地故障，0.2s故障清除；
收敛精度	10^{-6}
仿真时段	2.0s
仿真步长	0.001s

表 6-2 测试系统仿真规模与仿真模型

计算节点总数	18	11号母线所接逆变器模型	恒功率控制 (模拟不可调分布式电源特性)
计算支路总数	16	17号母线所接逆变器模型	恒功率控制 (模拟不可调分布式电源特性)
受控交流电压源数	3	18号母线所接逆变器模型	下垂控制 (模拟可调分布式电源或储能元件特性)
负荷总数	3	负荷模型	三相星形接地不平衡恒阻抗负荷
系统容量基准值	1MVA	系统电压基准值	400V

图 6-1～图 6-6 给出表 6-1 中三种故障情况下的仿真结果曲线，其中实线表示本文所开发仿真软件的显式交替求解法仿真结果，虚线表示 DIgSIELNT 仿真结果。

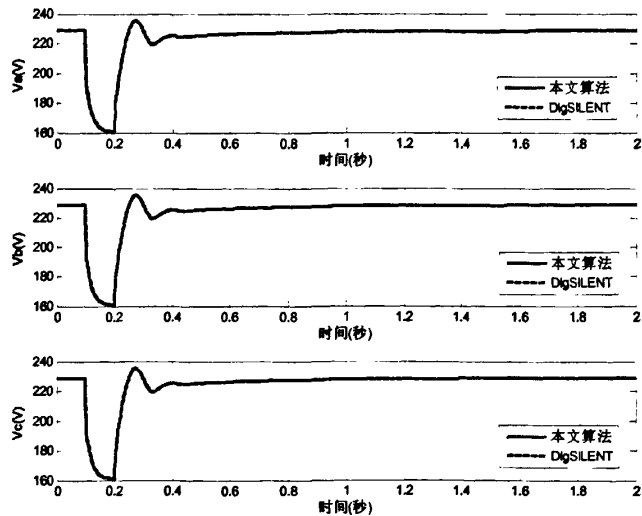


图 6-1 18 号母线三相电压幅值（三相金属性短路接地）

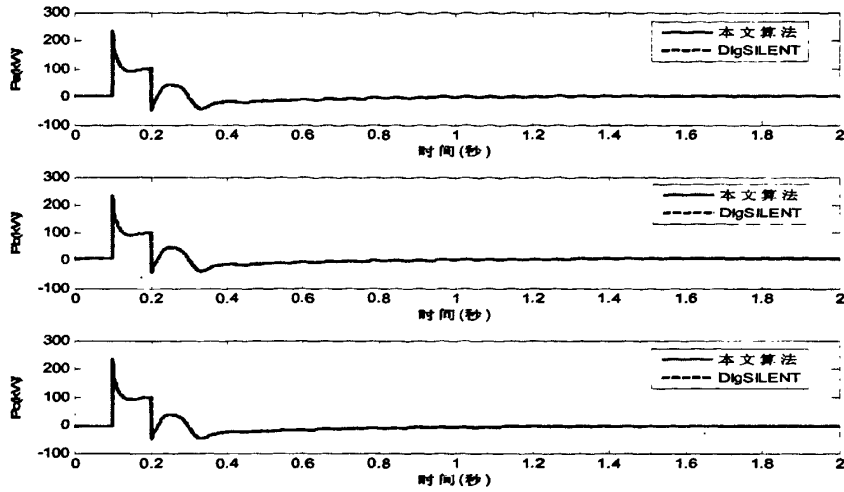


图 6-2 18 号母线三相有功功率 (三相金属性短路接地)

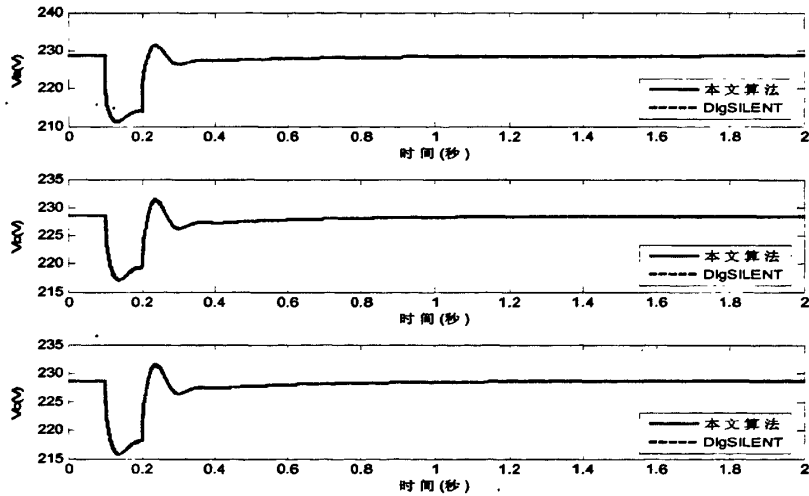


图 6-3 18 号母线三相电压幅值 (A 相单相金属性短路接地)

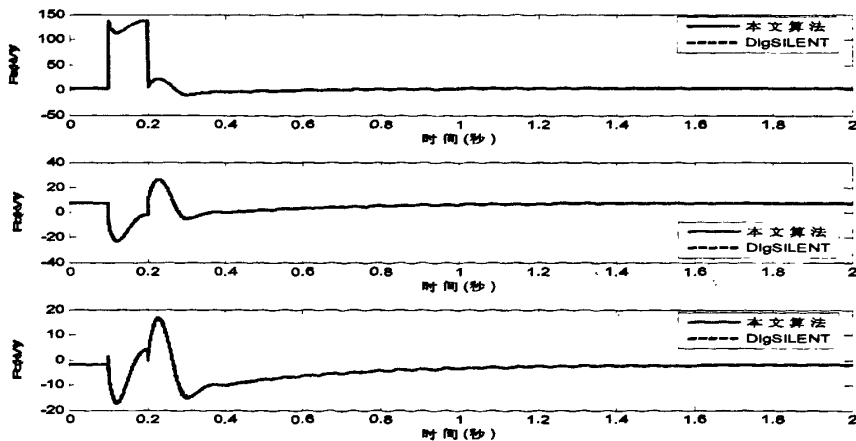


图 6-4 18 号母线三相有功功率 (A 相单相金属性短路接地)

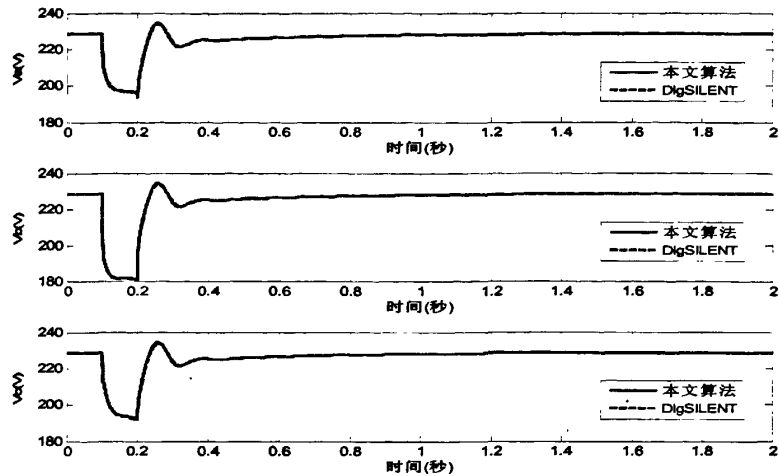


图 6-5 18 号母线三相电压幅值 (AB 相两相金属性短路接地)

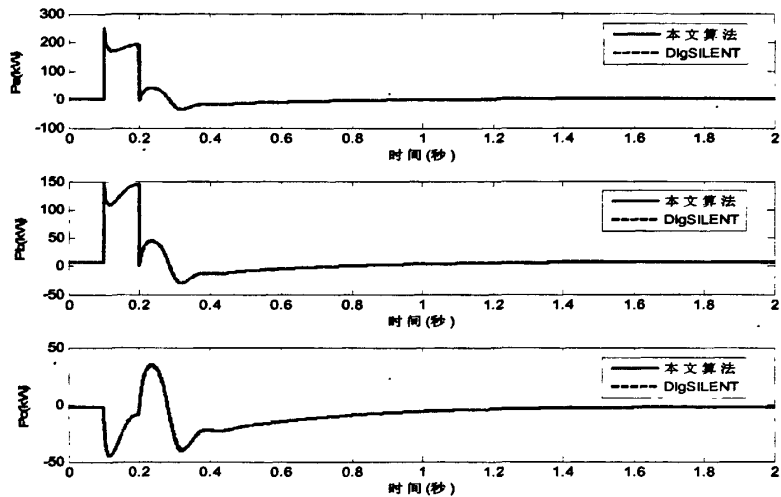


图 6-6 18 号母线三相有功功率 (AB 相两相金属性短路接地)

孤岛操作是分布式发电系统以微网形式运行的一种特有的操作模式，当主网发生扰动或者故障的情况下，低压侧系统和主网断线形成孤岛方式运行，以下是与测试相关的数据。

表 6-3 孤岛故障试验数据表

本文算法	考虑逆变器主导型低压分布式发电系统稳定性仿真 (四阶显式R-K算法)
测试故障描述1	18号母线所接逆变器为下垂控制方式： 0.1s时刻，在1-2号线路处发生三相断线故障，2号母线以下网络形成孤岛运行方式。
测试故障描述2	18号母线所接逆变器为V/f控制方式：

	0s时刻，在1-2号线路处发生三相断线故障，2号母线以下网络形成孤岛运行方式。
收敛精度	10^{-6}
仿真时段	2.0s
仿真步长	0.001s

表 6-4 测试系统仿真规模与仿真模型

计算节点总数	18	11号母线所接逆变器模型	恒功率控制 (模拟不可调分布式电源特性)
计算支路总数	17	17号母线所接逆变器模型	恒功率控制 (模拟不可调分布式电源特性)
受控交流电压源数	3	18号母线所接逆变器模型	下垂控制或V/f控制 (模拟可调分布式电源或储能元件特性)
负荷总数	3	负荷模型	三相星形接地不平衡恒阻抗负荷
系统容量基准值	1MVA	系统电压基准值	400V

图 6-7—图 6-10 给出了表 6-3 中孤岛故障情况下的仿真结果曲线。

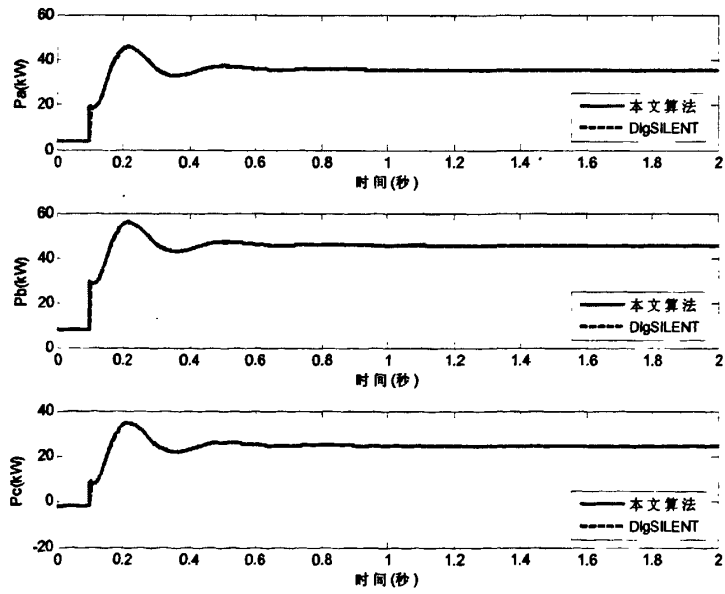


图 6-7 18 号母线三相有功功率（18 号母线逆变器为下垂控制方式）

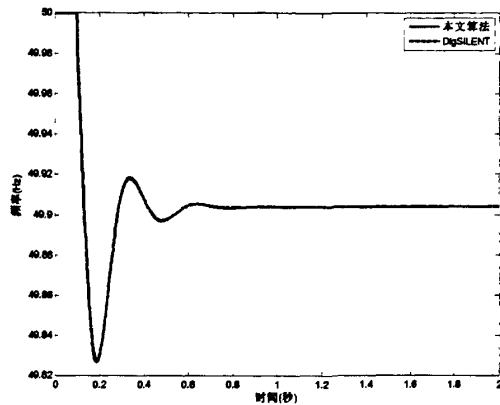


图 6-8 18 号母线输出频率（18 号母线逆变器为下垂控制方式）

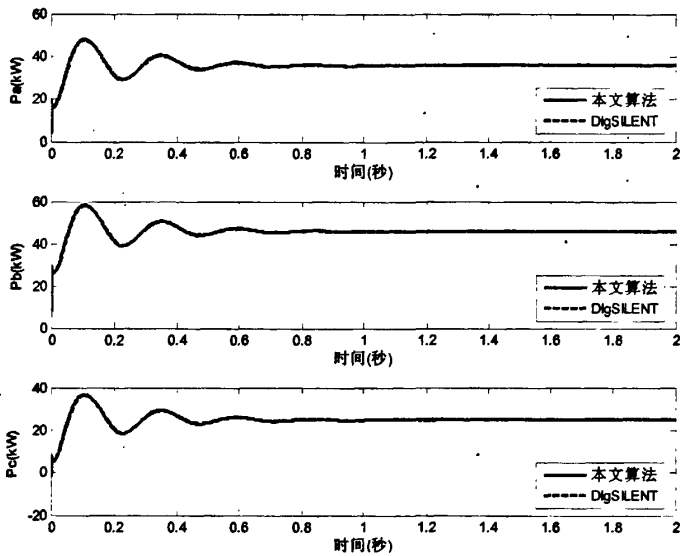


图 6-9 18 号母线三相有功功率（18 号母线逆变器为 V/f 控制方式）

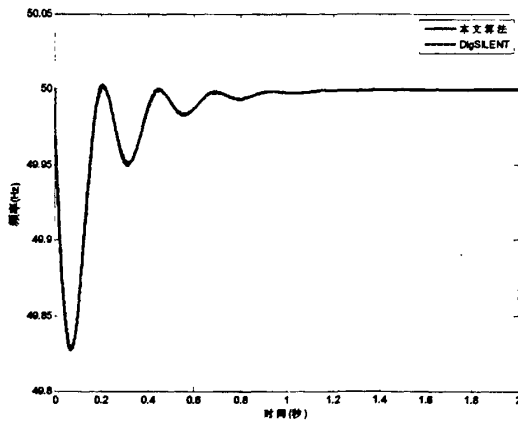


图 6-10 18 号母线输出频率（18 号母线逆变器为 V/f 控制方式）

两个测试算例比较结果表明采用本文开发的仿真软件中显式交替求解算法与 DigSILENT 的计算结果是一致的，该算法的正确性得到验证。在孤岛操作过程中，18 号逆变器采用下垂控制方式，测量母线频率由 50Hz 降至 49.90Hz，采用 V/f 控制之后，测量母线频率仍然可以恢复到 50Hz，两种控制方式下，18 号母线所连 DG 或储能元件的三相有功功率均要增加，以弥补孤岛后的功率缺额。

6.3 数值微分求导的隐式交替求解算法的仿真验证

6.3.1 算例系统描述

系统接线图参见附录 B 图 B-2，1 号母线为主网接入点，母线 10、11、15 分别接有 1、2、3 号分轴微型燃气轮机发电系统，负荷为恒定阻抗。为计算方便，系统参数对称，不计及三相不平衡情况。分布式电源、负荷及线路参数、分轴微型燃气轮机的动态参数请参见附录 B 表 B-6~表 B-8。

表 6-5 三相短路故障试验数据表

本文算法	数值微分法求导的隐式交替求解算法
直接求导法	通过解析求导公式直接计算雅可比矩阵的隐式交替求解算法
测试故障描述	0.1s时刻在12-13线路之间靠近12号母线处发生三相金属性短路接地，0.2s清除故障
算法收敛精度	10^{-6}
数值微分法扰动量数量级	10^{-5}
更新雅克比次数	按照校正步总迭代次数，每500次迭代进行一次雅可比矩阵更新
测试指标	测试指标1： 1号和2号发电机相对功角 测试指标2： 2号发电机角速度偏差 测试指标3： 2号电磁功率
仿真时段	10.0s
仿真步长	0.01s

表 6-6 测试系统仿真规模与仿真模型

计算节点总数	18	燃气轮机模型	分轴型燃气轮机
计算支路总数	17	发电机模型	经典二阶发电机模型
负荷总数	5	负荷模型	恒阻抗负荷

系统容量基准值	1MVA	系统电压基准值	400V
---------	------	---------	------

6.3.2 算法性能测试与仿真结果分析

为了分析算法的计算效率，将本文所提出的方法与通过解析求导公式直接进行雅可比矩阵计算的方法（以下简称直接求导法）进行了对比。仿真计算中，两种算法均使用预测校正算法，并与伪牛顿方法相结合。预测步均采用向前欧拉积分法预测状态变量，通过代数方程求解预测代数变量。对于更新操作，直接求导法实现填元操作，本文方法实现扰动操作。

确定燃机动态运行参数，使仿真过程中出现系统的转速控制和温度控制环节交替起作用情况，即出现变结构特征。分别采用直接求导法、考虑变结构仿真策略的本文算法进行计算。预测步在 6.10s 检测出燃机内部仿真路径从路径 2 转向路径 1。从计算结果图 6-11~图 6-13 可以看出，在系统模型变结构前后，本文算法都可以达到与直接求导法相同的计算精度。

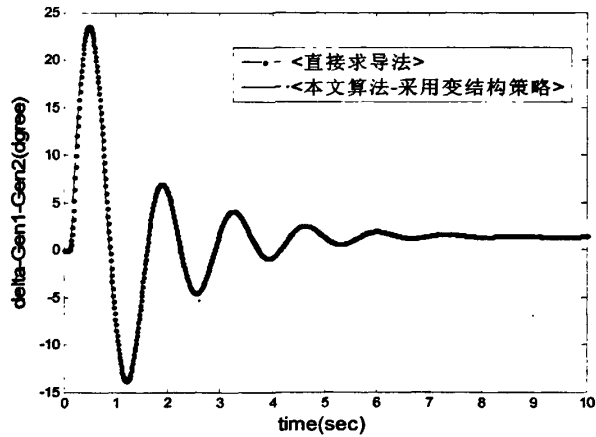


图 6-11 1-2 号发电机相对功角(度)

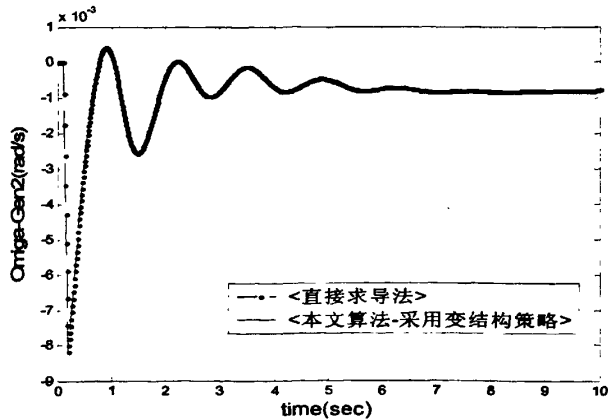


图 6-12 2 号发电机角速度偏差(弧度/秒)

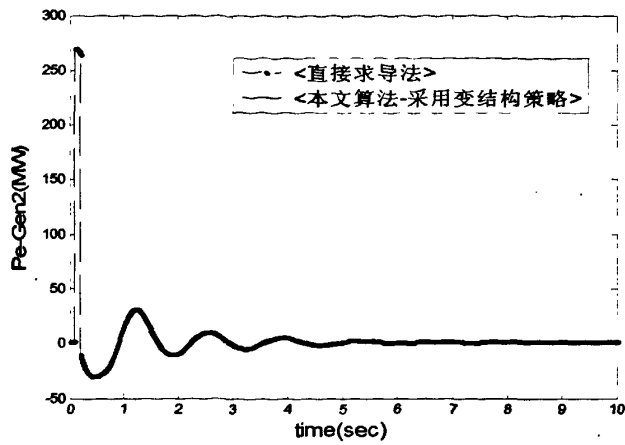


图 6-13 2 号电磁功率(兆瓦)

表 6-7 对两种算法的计算性能进行了比较, 由于预测步计算方法相同, 因此耗时基本相同; 从计算统计结果可以看出, 本文算法采用扰动方式计算雅可比矩阵, 校正步状态方程迭代次数略多于直接求导法, 同时代数方程迭代次数、计算耗时也相应有所增加, 但两种算法总仿真耗时相差不多。同时可以从表中可以看出扰动操作更新雅可比矩阵的时间较多, 随着网络规模的增大和方程复杂程度的增加, 这一部分的计算代价可能会增加, 此时可以通过并行处理的方式进一步降低扰动计算时间。

表 6-7 两种算法性能比较

算法类型	仿真耗时	预测步	校正步					
		计算耗时	状态方程迭代次数	状态方程计算耗时	代数方程迭代次数	代数方程计算耗时	扰动操作耗时	填元计算操作耗时
本文算法	189.209	22.097	3445	166.097	5809	85.473	6.061	/
直接求导法	176.921	23.166	2990	151.234	4973	75.299	/	5.037
说明: 耗时均采用毫秒(ms)单位计								

6.4 含分布式电源动态模型的仿真测试算例

6.4.1 算例系统描述

系统接线图参见附录 B 图 B-3, 1 号母线为主网接入点, 母线 11 接入固体氧化物燃料发电系统(采用逆变器直接接网)、母线 17 接入以理想恒压源模型建

模的蓄电池并网系统、母线 18 接入采用异步发电机直接并网的恒频恒速发电系统。分布式电源、三相线路参数、三相潮流潮流、逆变器动态参数请参见附录 B 表 B-9～表 B-11。

表 6-8 孤岛故障试验数据表

测试算法	考虑分布式电源和储能装置动态的分布式发电系统稳定性仿真 (数值微分法求导的隐式交替求解算法)
测试故障描述	0.1s时刻在1-2号线路处发生三相断线故障，2号母线以下网络形成孤岛运行方式。
算法收敛精度	10^{-6}
数值微分法扰动量数量级	10^{-5}
仿真时段	30.0s
仿真步长	0.001s

表 6-9 测试系统仿真规模与仿真模型

计算节点总数	18	11号母线 燃料电池并网系统	采用固体氧化物燃料电池模型 所接逆变器采用恒功率控制
计算支路总数	17	18号母线 风力发电并网系统	采用恒频恒速风力发电系统模型 (采用单鼠笼型三阶异步发电机直接 并网，以及主动失速控制方式)
分布式并网系统	3	17号母线 蓄电池并网系统	蓄电池采用恒压源理想模型 所接逆变器采用下垂控制方式
负荷总数	3	负荷模型	三相星形接地不平衡恒阻抗负荷
系统容量基准值	1MVA	系统电压基准值	400V

图 6-14—图 6-22 给出了表 6-3 中孤岛故障情况下的仿真结果曲线。

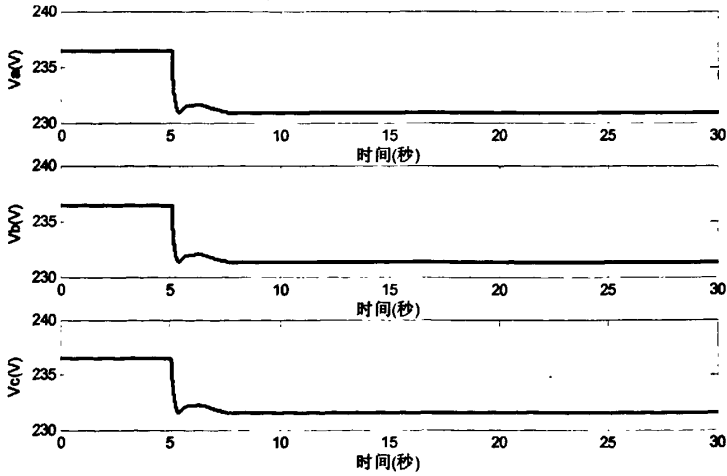


图 6-14 11 号母线三相电压幅值

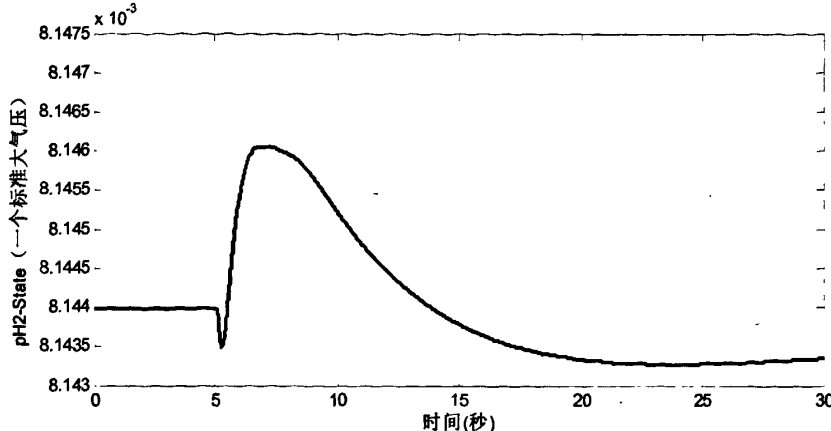


图 6-15 11 号母线所接燃料电池堆内部氢气压力

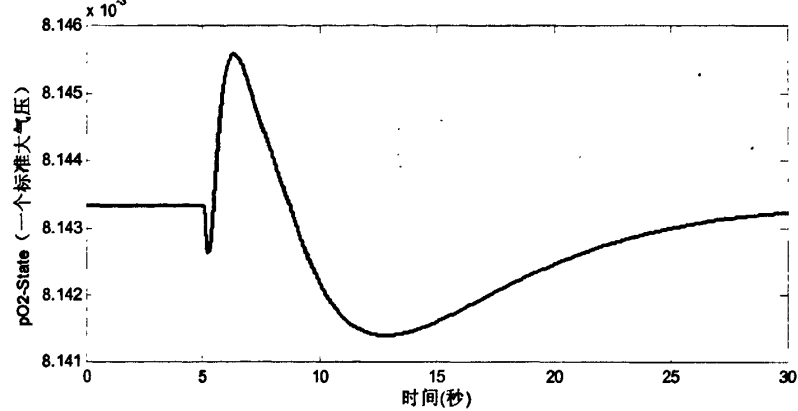


图 6-16 11 号母线所接燃料电池堆内部氧气压力

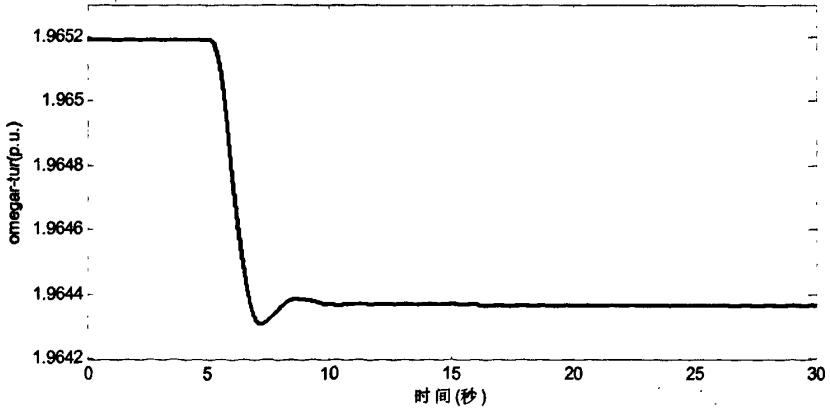


图 6-17 18 号母线风力机角速度 ω_{turb}

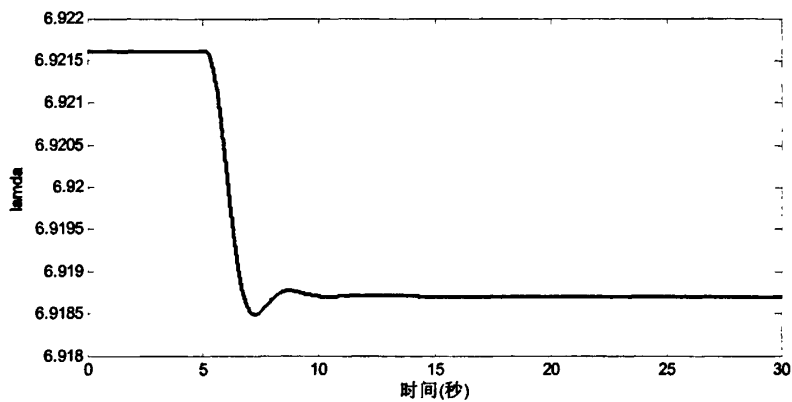


图 6-18 18 号母线风力机叶尖速比 λ

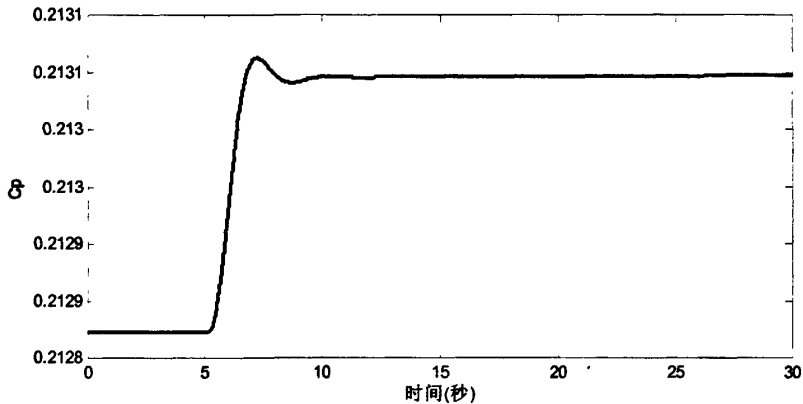


图 6-19 18 号母线风力机风能转换效率 C_p

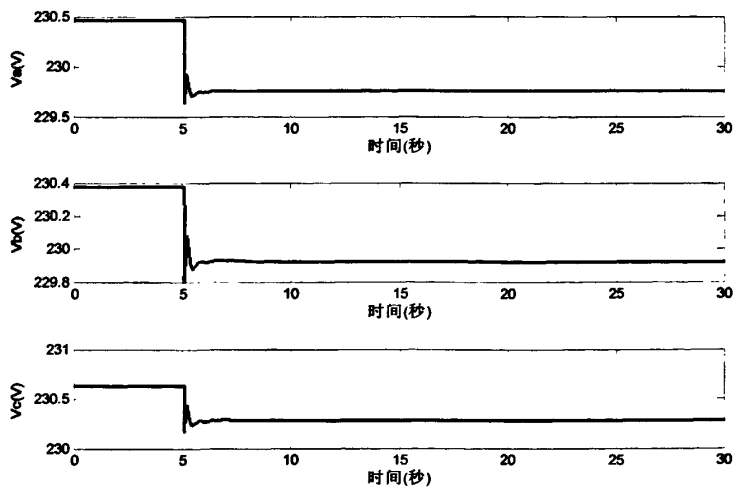


图 6-20 18 号母线三相电压幅值

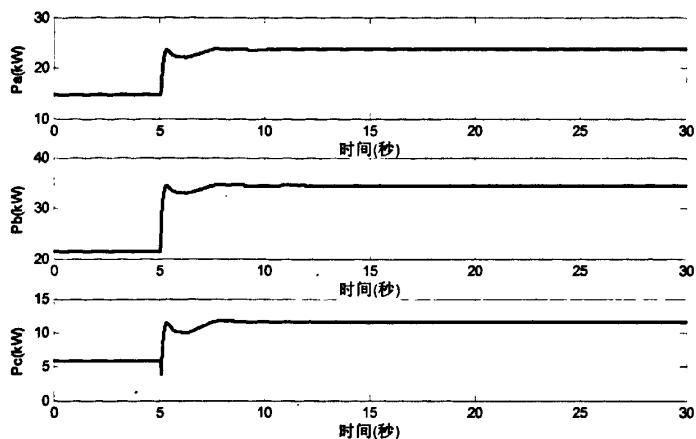


图 6-21 17 号母线所接逆变器输出三相有功功率

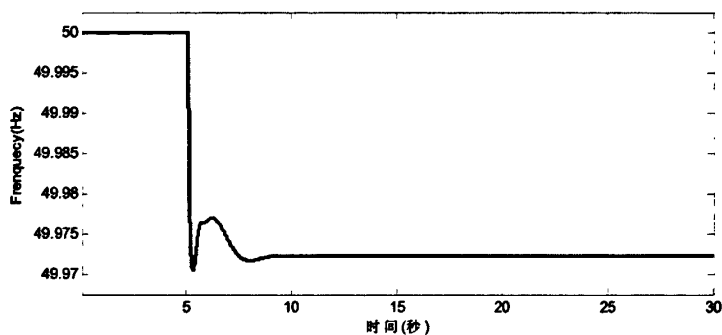


图 6-22 17 号母线输出频率（逆变器为下垂控制方式）

孤岛之后 11 号母线所接燃料电池堆电压下降，燃料电池内部氢气、氧气压力变化如图 6-16，图 6-17 所示。18 号母线所接风力机的风力机角速度下降，在风速不变化的情况下，风力机叶尖速比 λ 下降，则风力机风能转换效率 C_p 随之上升，进而调节风机出力增加。17 号母线所接的蓄电池采用下垂控制，孤岛之后输出有功增加以维持系统有功缺额，量侧母线频率由 50Hz 下降为 49.973Hz。

6.5 本章小结

本章以欧盟标准 400V 电压配电系统测试系统为基础，对本文开发的分布式发电系统稳定性仿真软件算法进行了验证，对以下三个方面的算法和模型进行验证和测试：（1）逆变器主导型分布式发电系统稳定性仿真算例测试；（2）数值微分求导的隐式交替求解算法的仿真算例验证；（3）考虑分布式电源动态模型的仿真算例验证。测试结果表明了算法的正确性和有效性。

第七章 全文总结

采用分布式发电供能技术,充分利用各地丰富的清洁和可再生能源,是实现“节能减排”目标的重要举措,分布式发电系统通过将各种不同的能源形式转换为电能加以利用,是分布式能源最有效的利用方式之一。如何对以微网形式存在、含有大量分布式电源的分布式发电系统建立合理的数学模型,进行数值模拟研究和仿真计算是其重要的基础工作。

本文的主要工作如下:

- 1) 提出了一种电力电子装置通用化准稳态模型,并将其应用于几种常见分布式发电并网系统的稳定性仿真模型的建模过程,简化了分布式发电模型的开发难度,增加了模型的模块化程度,增强了模型的复用性和可移植性。
- 2) 提出了一种新的预测-校正形式的隐式交替求解算法,采用自变量扰动操作的数值微分法,计算系统的雅克比矩阵元素。这种方法的优点在于不需要事先获得雅克比矩阵元素函数的解析信息,完全在原系统状态方程和代数方程的基础上直接通过数值计算获得,可以自动计及系统模型结构突变时的影响,具有程序开发简单和可靠性高等优点。考虑到分布式发电系统中非连续控制环节的大量存在,这一特点在分布式发电系统仿真软件的开发中具有独特的优势。
- 3) 在十字链表稀疏存储结构基础上,发展了一种适用于分布式发电系统稳定性仿真计算的网式链表结构,并基于该结构提出了一种网式链表-双层仿真算法(Mesh List-Double Layer Algorithm—MLDLA),针对三种常用稳定性仿真数值计算方法:显示交替求解法、隐式联立求解法、基于数值微分求导的隐式交替求解法,描述了采用MLDLA数据结构的实现原理。
- 4) 研究了分布式发电系统稳定性仿真程序设计问题,讨论了程序整体框架设计,重点介绍了采用面向对象设计的分布式发电系统稳定仿真结构:仿真单元层、网络连接层、系统仿真层的设计方法。在仿真单元层,考虑到分布式发电并网系统的结构多样性特点,采用“交直流双层母线树”结构对典型分布式发电系统并网系统进行描述,用于系统仿真层的整体算法求解。

本课题研究表明:本文提出的分布式发电系统建模、稳定性仿真算法和程序设计研发工作为研究分布式发电系统的内在动态特征和机理提供了一个有效的

途径,并且为进一步深入研究分布式发电系统的运行操作,尤其是微网的运行机理研究提供了仿真平台和研究工具。由于时间以及本人知识和能力的限制,本文中有一些内容有待在今后进一步提高和完善。例如:

- 1) 分布式发电系统中各种分布式电源、储能元件、电力电子装置的物理特性决定了其对应的数学模型具有强烈的非线性、混杂性特征,这对于分布式发电系统的数值计算方法的研究提出更高的要求,如何解决含有大量连续变量、非连续变量的混杂系统建模问题是今后分布式发电系统仿真领域中需要深入研究的课题。
- 2) 在本文的分布式发电系统稳定性分析仿真中,忽略了那些时间尺度相差很大的快动态过程,简化了元件模型,仿真步长可达毫秒级,但是无法捕捉系统中出现的快动态过程;而电磁暂态仿真更多地关心扰动前后系统中电气量的变化情况,特别是分布式电源与网络中其它元件在故障或操作过程中及其后详细的动态响应特性。但由于模型复杂、计算量大,它不宜用于大规模电网长时间仿真。对于分布式发电系统,如果能利用电磁暂态仿真在精度上的优势对所关心的局部网络或元件进行精确的暂态仿真,而其余部分则采用简化的稳定性模型进行仿真,则可以大幅度地提高仿真效率,达到仿真精度与仿真精度的一个良好折衷。因此今后分布式发电系统仿真算法应更多的关注全过程仿真算法,结合多速率仿真技术、并行技术等进一步提高分布式发电系统仿真效率。
- 3) 在程序开发设计方面,考虑到分布式发电系统模型种类众多,不同用户需求也是多种多样的,程序内部内置固化模型往往不能满足模型多样化的需求,因此开发分布式发电系统用户自定义模型接口、研究适合于分布式发电系统的用户自定义模型建模技术是完善程序功能和结构的必然选择。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)
http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm
- [2] EPRI. Distributed Energy Resources: Current Landscape and a Roadmap for the Future. EPRI, Palo Alto, CA: 2004. 1008415
- [3] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 周孝信, 电力系统全过程动态仿真的数值方法—电力系统全过程动态仿真软件开发之一, 电网技术 2002, 26(9):7-12, 28
- [4] Reza, M. , Schavemaker, P.H. , Slootweg, J.G. , et al. Impacts of distributed generation penetration levels on power systems transient stability, Power Engineering Society General Meeting, 2004 IEEE, June 2004:2150-2155
- [5] Slootweg, J.G. , Kling, W.L. Impacts of distributed generation on power system transient stability, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, July 2002:862-867
- [6] Tran-Quoc, T., Le Thanh, L., Andrieu, Ch., et al. Stability analysis for the distribution networks with distributed generation, Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, May 2006:289-294
- [7] Reza, M., Sudarmadi, D., Viawan, F.A., Kling, W.L. , et al. Dynamic stability of power systems with power electronic interfaced DG, Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006:1423-1428
- [8] Wu, Y. Zhang, A. Arulampalam, N. Jenkins. Electrical stability of large scale integration of micro generation into low voltage grids, International Journal of Distributed Energy Resources, 2005, 1(4): 279-298
- [9] Narain G. Hingorani, Power Electronics Building Block Concepts, Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE Volume 3, 13-17 July 2003:1339-1343
- [10] Treanton, B.G. DER Integration Research Program Power Electronics Research Assessment.
http://www.energy.ca.gov/pier/conferences+seminars/2006-06-23_microgrids_montreal/presentations/Presentation_7_Part2_Bernard.pdf
- [11] W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, H. Thomas, Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems Part I: Systems and Topologies, NREL Report No. SR-560-38017
- [12] 黄家裕, 陈礼义, 孙德昌, 电力系统数字仿真, 北京: 中国水力电力出版社, 1995
- [13] 余贻鑫, 陈礼义, 电力系统的安全性和稳定性, 北京: 科学出版社, 1988
- [14] EPRI, Ontario Hydro, Extended transient-midterm stability program (ETMSP), in User's Manual: Version 3.1, EPRI TR-102004-V2R1, Final Report, May, 1994, 1-6
- [15] Stubbe M, Bihain A, Deuse J, Baader J C, STAG-a new unified software program for the study of the dynamic behaviour of electrical power systems, IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 11(1): 129-138
- [16] Sanchez-Gasca C J J, et al, Extended-term dynamic simulation using variable time step

- integration, IEEE Computer Application in Power, 1993, 6(5): 23-28
- [17] Sancha J L, et al, Application of long-term simulation programs for analysis of power system islanding, IEEE Trans. on Power Systems, 1997, 12(1): 189-197
- [18] ABB Power Systems Analysis Department, SIMPOW power system simulation and analysis software user manual
- [19] Hans R Frankhauser, et al, Advanced simulation techniques for the analysis of power system dynamics, IEEE Computer Application in Power, 1990, 3(5): 31-36
- [20] 汤涌, 卜广全, 侯俊贤, 宋新立, PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册. 北京: 中国电力科学研究院
- [21] DeMello F P, Feltes J W, Laskowski T F, et al, Simulating fast and slow dynamic effects in power system, IEEE Computer Applications in Power, 1992, 5(3): 33-39
- [22] 潘志宏, 孙宏斌, 张伯明, 等, 新一代 DTS 中的动态仿真程序, 清华大学学报, 1999, 39(9): 18-21
- [23] Kurita A, Okubo H, Oki K, Agematsu S, et al, Multiple time-scale power system dynamic dimulation, IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8(1): 216-223
- [24] M Stubbe, A Bihain, J Deuse, STAG-a new unified software program for the study of the dynamic behavior of power systems, IEEE Trans. on Power Systems, 1989, 4(1): 129-138
- [25] Gear C W, Simultaneous numerical solution of differential-algebraic equations, IEEE Trans. on Circuit Theory, 1971, 18(1): 90-95
- [26] Araujo A E A, Dommel H W, Marti Jr, Simultaneous solution of power and control-systems equations, IEEE Trans. on Power Systems, 1993, 8(4): 1483-1489
- [27] Stott B, Power system dynamic response calculations, Proc. of IEEE, 1979, 67(2): 219-241
- [28] 倪以信, 陈寿松, 张宝霖, 动态电力系统的理论和分析, 北京: 清华大学出版社, 2002
- [29] Mao C X, Fan J, Malik O P, et al, Simulation of power system dynamics by the singular perturbation technique, Proceedings of the IEEE Western Canada Conference on Computer, Power and Communications Systems in a Rural Environment, 1991
- [30] 汤涌, 电力系统稳定计算隐式积分交替求解, 电网技术, 1997, 21(2): 43-52
- [31] 毛承雄, 樊俊, Kulicke B, 电力系统动态仿真新的交替迭代解法, 电力系统自动化, 1998, 22(3): 23-26
- [32] Bandeno P L, Kundur P, A non-iterative transient stability program including the effects of variable load-voltage characteristics, Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, 1973, 91-96
- [33] Moon Y H, Cho B H, Choi B K, Analysis of polarized linear electric network with two-reactance components, Proc, of the 37th CDC, 1998, 2028-2034
- [34] Moon Y H, Cho B H, Ryu H S, Saliency reflected noniterative approach to transient stability simulation of power systems, Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, 1999, 1: 689-694
- [35] Moon Y H, Cho B H, Choi B K, Fast noniterative algorithm based on polarized-system partitioning for transient stability simulation, Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, 2000, 2:1022-1027
- [36] Moon Y H, Cho B H, Fast time simulation technique using noniterative algorithm of transient

- stability analysis, Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, 2000, 1: 23-27
- [37] Xia D Z, On-line transient evaluation by system decomposition aggregation and high order derivatives, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1983, 102: 2038-2054
- [38] D Z Fang and Xiaodong Yang. Power system transient stability simulation based on module bi-directional iteration. Science in China (Series E), 2005, 48(5): 585-600
- [39] 白雪峰, 余志文, 郭志忠, 姜 彤, 不对称暂态稳定计算新方法, 电力系统自动化, 2002, 26(22): 27-30
- [40] Junji Tamura, Masahiro Kubo, Toshiyuki Nagano, A Method of Transient Stability Simulation of Unbalanced Power System, Electric Power Engineering, PowerTech Budapest 99. International Conference, 1999: 232
- [41] 姜彤, 白雪峰, 郭志钟等, 基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法, 电机工程学报, 2003, 23(2): 50-53
- [42] 温苑红, 方富淇, 电力系统故障分析的相网络计算法, 电力系统自动化, 1998, 22(2):35-37
- [43] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析. 北京: 清华大学出版社, 1996
- [44] Xuefeng Bai, Tong Jiang, Zhizhong Guo, et al, A Unified Approach for Processing Unbalanced Conditions in Transient Stability Calculations, IEEE Trans. on Power Systems, 2006, 21(1): 85-90
- [45] 唐长青, 罗铸, 顾永昌, 基于三相导纳阵的不对称故障计算, 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(1):89-92
- [46] 刘为雄, 蔡泽祥, 基于相分量法的电力系统复故障计算, 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3):91-95
- [47] 刘为雄, 蔡泽祥, 黄明辉等, 基于相分量模型考虑零序互感线路的跨线故障计算方法, 电网技术, 2006, 30(8):13-18
- [48] 傅旭, 王锡凡, 同杆双回路断相故障计算的解耦相分量法, 电力系统自动化, 2004, 28(6):41-44
- [49] R. G. Harley, E. B. Makram and E. G. Duran, The Effects of Unbalanced Networks on Synchronous and Asynchronous Machine Transient Stability, Electric Power System Research Journal, 1987, 13:119-127
- [50] V.Omar Zambrano, Elham B.Makram. Transient Response of Synchronous and Asynchronous Machine to Asymmetrical Faults in an Unbalanced Network. Electric Power System Research, 1988, 14:155-166
- [51] Ronald G Harley, Jorge M E Coda, Glenn D Jennings, et al, INDUCTION MOTOR MODEL FOR THE STUDY OF TRANSIENT STABILITY IN BOTH BALANCED AND UNBALANCED MULTI-MACHINE NETWORKS, IEEE Transactions on Energy Conversion, 1992, 7(1):209-215
- [52] Ronald G Harley, Elham B. Makram, Edwin G. Dum, THE EFFECTS OF UNBALANCED NETWORKS AND UNBALANCED FAULTS ON INDUCTION MOTOR TRANSIENT

- STABILITY, IEEE Transactions on Energy Conversion, 1988, 3(4):398-403
- [53] E. B. Makram, M. A. Bou-Rabee and A. A. Girgis, Three-phase Modeling of Unbalanced Distribution Systems During Open Conductors and/or Shunt Fault Conditions Using the Bus Impedance Matrix, Electric Power System Research Journal, 1987, 13(3):173-183
- [54] Elham B. Makram V. Omar Zambrano Ronald G. Harley Juan C. Balda, THREE-PHASE MODELING FOR TRANSIENT STABILITY OF LARGE SCALE UNBALANCED DISTRIBUTION SYSTEMS, IEEE Trans. on Power Systems, 1989, 4(2): 487-493
- [55] Nikos L. Souttanis, Stavros A. Papathanasiou, Nikos D. Hatziaargyriou, A Stability Algorithm for the Dynamic Analysis of Inverter Dominated Unbalanced LV Microgrids, IEEE Trans. on Power Systems, 2007, 22(1): 294-304
- [56] Sebastian Achilles, Markus P'oller, Direct Drive Synchronous Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms. Proceedings of the Fourth International Workshop on Large Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Billund, Denmark, October 20-21 2003
- [57] 程华, 徐政, 分布式发电中的储能技术, 高压电器, 2003, 39(3):53-56
- [58] N. Jayawarna, X. Wut, Y. Zhangt, and et al. Stability of a MicroGrid, The 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Ireland, 2006: 316-320
- [59] JEROSOL IMSKI M, L EVACHER L, A new method for fast calculation of Jacobin matrices: automatic differentiation for power system simulation. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1994, 9(2): 700-706
- [60] 陈颖, 沈沉, 梅生伟, 等, 基于Jacobian-Free Newton-GMRES(m)方法的电力系统分布式暂态仿真算法, 电力系统自动化, 2006, 30(10):12-16
- [61] Ying Chen,, Chen Shen, Jian Wang, Distributed Transient Stability Simulation of Power Systems Based on a Jacobian-Free Newton-GMRES Method, IEEE Trans. on Power System, 2009, 24(1): 146-156
- [62] 苏永春, 程实杰, 文劲宇, 电力系统动态稳定性的解析延拓分析, 中国电机工程学报, 2007, 27(4):9-14
- [63] Dommel H W, Digital computer solution of electromagnetic transient in single and multiphase networks. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1969,88(4):388-399
- [64] Pablo Ledesma, Julio Usaola, Doubly Fed Induction Generator Model for Transient Stability Analysis, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005,20(2):388-397
- [65] PSS/ETM 29, VOLUME II:PROGRAM APPLICATION GUIDE, Power Technologies,INC
- [66] DIgSILENT v 14.0 User's Manual, DIgSILENT GmbH, 2008, <http://www.digsilent.de/>
- [67] Enns, M.K., Tinney, W.F., Alvarado, F.L. Sparse matrix inverse factors [power systems] , IEEE Trans. on Power Systems, 1990:466-473
- [68] Hakavik, B., Holen, A.T. Power system modelling and sparse matrix operations using object-oriented programming. IEEE Trans. on Power Systems, 1994:1045~1051
- [69] Vuong, G.T., Chahine, R., Granelli, G.P., Montagna, M. Dependency-based algorithms for vector processing of sparse matrix forward/backward substitutions. IEEE Trans. on Power Systems,

- 1996: 198-205
- [70] H.J. Zhu, Z.X. Cai, Object-oriented modeling of sparse matrix operation in power system software. *Advances in Power System Control, Operation and Management*, 2003. ASDCOM 2003. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 497), 732-737
- [71] 王晓东, 李乃湖, 丁怡, 基于稀疏技术的原对偶内点法电压无功功率优化, *电网技术*, 1999, 23(3):23-26
- [72] 何银菊, 宋玮, 周庆捷, 等, 面向对象的电力系统潮流计算与静态安全分析. *电网技术*, 2001, 25(8):11-14
- [73] 何洋, 洪潮, 陈昆薇, 稀疏向量技术在静态安全分析中的应用. *中国电机工程学报*, 2003, 23(1):41-44
- [74] 毛安家, 郭志忠, 电力系统计算中的二维稀疏结构技术. *继电器*, 2001, 29(1):19-21
- [75] 朱凌志, 安宁, 基于二维链表的稀疏矩阵在潮流计算中的应用, *电网技术*, 2005, 29(8):51-54
- [76] 朱浩骏, 蔡泽祥, 侯汝锋, 基于 CIM 的稀疏矩阵模型设计. *电力系统自动化*, 2004, 28(24):50-54
- [77] Louis N, George Jee, Fardanesh B, A governor turbine model for a twin-shaft combustion turbine. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1995, 10(1):133-140
- [78] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Dynamic models for combined cycle plants in power system studies. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1994, 9(3):1698-1708
- [79] Amer Al-Hinai, Feliachi Ali, Dynamic model of a microturbine used as a distributed generator. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2002, 1(1):209-213
- [80] 王成山, 马力, 王守相, 基于双 PWM 换流器的微型燃气轮机系统仿真, *电力系统自动化*, 2008, 32(1):56-60
- [81] Hannett LN, Combustion turbine dynamic model validation from tests, *IEEE Trans. on Power Systems*, 1993, 8(1):152-158
- [82] 孙可, 韩祯祥, 曹一家, 微型燃气轮机系统在分布式发电中的应用研究, *机电工程*, 2005, 22(8):55-60
- [83] 王静, 崔国民, 张勤等, 微型燃气轮机的控制研究, *机电设备*, 2004, 1(4):1-6
- [84] 沈海权, 李庚银, 周明, 燃料电池和微型燃气轮机的动态模型综述, *电网技术*, 2000, 28(14): 79-89
- [85] M. Z. C. Wanik, I. Erlich, Dynamic Simulation of Microturbine Distributed Generators integrated with Multi-Machines Power System Network, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia: 1545-1550
- [86] Amer Al-Hinai, Karl Schoder, Feliachi Ali, Control of grid-connected split-shaft microturbine distributed generator, *IEEE Trans. on Power Systems*, 2003, 1(1):84-88
- [87] M'onica Chinchilla, Santiago Arnaltes, Juan Carlos Burgos. Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2006, 21(1)
- [88] Roohollah Fadaeinedjad, Mehrdad Moallem, Gerry Moschopoulos, Simulation of a Wind Turbine

- With Doubly Fed Induction Generator by FAST and Simulink, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2008,23(2)
- [89] Anca D. Hansen, Clemens Jauch, Poul Sørensen, Florin Iov, Frede Blaabjerg, Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DigSILENT, Risø National Laboratory, Roskilde December 2003
- [90] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen, Frede Blaabjerg, Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink, Aalborg University March 2004
- [91] Nicholas W. Miller, William W. Price, Juan J. Sanchez-Gasca, Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators, October 27, 2003
- [92] Darren M Bagnall, Matt Boreland, Photovoltaic technologies, Energy Policy, 2008, 36:4390-4396
- [93] 汉斯. S. 劳申巴赫, 太阳能阵列设计手册, 宇航出版社, 1987
- [94] J. A. Gow, C. D. Manning, Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies, IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1999, 146(2):193-200
- [95] Ali Cheknane, Hikmat S. Hilal, Faycal Djeflal, et al, An equivalent circuit approach to organic solar cell modeling, Microelectronics Journal, 2008, 39:1173-1180
- [96] M. Wolf, G. T. Noel, Richard. J. Stirn, Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cells, IEEE Trans. on Electron Devices, 1977, 24(4):419-428
- [97] M. G. Molina, P. E. Mercado, Modeling and Control of Grid-connected Photovoltaic Energy Conversion System used as a Dispersed Generator, Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2008
- [98] R. Chenni, M. Makhlof, T. Kerbache, et al, A detailed modeling method for photovoltaic cells, Energy, 2007, 32:1724-1730
- [99] Trishan ESRAM, Patrick. L. Chapman, Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2007, 22(2):439-499
- [100] K.H. Hussein, Muta, Hoshino, M. Osakada, Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 1995, 142(1): 59-64
- [101] J. Ghaisari, M. Habibi, A. Bakhshai, An MPPT Controller Design for Photovoltaic (PV) Systems Based on the Optimal Voltage Factor Tracking, IEEE Canada Electrical Power Conference, 2007:1-4
- [102] Zhu Y, Tomsovic K, Development of models for analyzing the load-following performance of micro turbines and fuel cells, Electric Power Systems Research, 2002, 62(1):1-11
- [103] Li Y, Choi S, Rajakaruna S, An analysis of the control and operation of a solid oxide fuel-cell power plant in an isolated system, IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, 20(2):381-387
- [104] Francisco Jurado, Manuel Valverde, Antonio Cano, Effect of a SOFC plant on distribution system stability, Journal of Power Sources, 2004, 129 (1):170-179
- [105] Miao Z, Choudhry M. A, Klein R. L, et al, Study of a fuel cell power plant in power distribution system – Part I: dynamic model, Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2004,

- 6(2):2220-2225
- [106] Padulles J, Ault G W, McDonald J R, An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation, *Journal of Power Sources*, 2000, 86(1-2):495-500
- [107] Khan M.J, Lqbal M.T, Modeling and analysis of electro-chemical, thermal, and reactant flow dynamics for a PEM fuel cell system, *Fuel Cells*, 2005, 5(4):463-475
- [108] Zhan C J, Wu X G, Kromlidis S, Ramachandaramurthy V K, Barnes M, Jenkins N, Ruddell A J, Two electrical models of the lead-acid battery used in a dynamic voltage restorer, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 2003, 150(2):175-182
- [109] Wang X Y, Vilathgamuwa D M, Choi S S, Buffer scheme with battery energy storage capability for enhancement of network transient stability and load ride-through, *Journal of Power Sources*, 2008, 179(2):819-829
- [110] 王兆安, 黄俊, 电力电子技术(第4版), 北京:机械工业出版社, 2003:54-59
- [111] 徐德鸿, 电力电子系统建模及控制, 北京:机械工业出版社, 2006:125-135
- [112] D. M. Brod, D. W. Novotny, Current control of VSI-PWM inverters, *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, 1985, IA-21(3):562-570
- [113] Rusong Wu, S.B.Dewan, G.R. Slemon. Analysis of a PWM AC to DC voltage source converter under the predicted current control with a fixed switching frequency, *IEEE Trans. Ind Applicant*, 1991, 27(4):756-764
- [114] Rusong WU, Shashi B, DEWAN, Gordon R. SLEMON et al, A PWM AC-DC Converter with Fixed Switching Frequency, *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, 1990, 26(5):880-885
- [115] A comparative study of control techniques for PWM rectifiers in AC adjustable speed drives, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2003:1390-1396
- [116] Markus A. P'oller, Doubly-Fed Induction Machine Models for Stability Assessment of Wind Farms, *Proceedings of the 2003 IEEE PowerTech Conference*, Bologna, 2003
- [117] Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, et al, Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation System, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 2006, 53(5): 1398-1409
- [118] 刘凤君, 逆变器用整流电源, 北京:机械工业出版社, 2004:202
- [119] Fangrui Liu, Yong Kang, Yu Zhang and Shanxu Duan. Comparison of P&O and Hill Climbing MPPT Methods for Grid-Connected PV Converter, *ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on 3-5 June 2008*:804-807
- [120] Roberto CALDON, Fabrizio ROSSETTO, Roberto TURRI, ANALYSIS OF DYNAMIC PERFORMANCE OF DISPERSED GENERATION CONNECTED THROUGH INVERTER TO DISTRIBUTION NETWORKS, *17th International Conference on Electricity Distribution Barcelona*, 12-15 May 2003
- [121] 王庆平, 陈超英, 陈礼义, 基于 abc 坐标系统的机-网暂态仿真, *中国电机工程学报*, 2002, 22(6):30-33
- [122] 吴文传, 张伯明, 变压器详细模型推导与三相配电潮流计算, *电力系统自动化*, 2003, 27(4):53-56
- [123] Ray D. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution*

- Algorithms and Analysis, Ph.D. Dissertation, Cornell Univ., Ithaca, NY, Jan. 1995
- [124]王守相, 王成山 编著, 现代配电系统分析, 高等教育出版社, 2007
- [125]J. Tamura, M. Cubo, and T. Nagano, A method of transient stability simulation of unbalanced power system, presented at the Proc, 1999 IEEE Power Tech Conf., paper BTP99-136-12
- [126]V.Omar Zambrano, Elham B.Makram, Transient Response of Synchronous and Asynchronous Machine to Asymmetrical Faults in an Unbalanced Network, Electric Power System Research, 1988, 14:155-166
- [127]Ronald G Harley, Jorge M E, Coda Glenn D Jennings, INDUCTION MOTOR MODEL FOR THE STUDY OF TRANSIENT STABILITY IN BOTH BALANCED AND UNBALANCED MULTI-MACHINE NETWORKS, IEEE Trans. on Energy Conversion, 1992, 7(1):209-215
- [128]Ronald G. Harley, Elham B. Makram, Edwin G. Dum, THE EFFECTS OF UNBALANCED NETWORKS AND UNBALANCED FAULTS ON INDUCTION MOTOR TRANSIENT STABILITY, IEEE Trans. on Energy Conversion, 1988, 3(2): 308-403
- [129]王成山, 张家安, 分布式暂态稳定仿真的面向对象分析与设计, 电网技术, 2003, 27(12): 27-50
- [130]RUDION K, STYCZYNSKI Z A, HATZIARGYRIOU N, PAPATHANASSIOU S, et al, Development of benchmarks for low and medium voltage distribution networks and high penetration of dispersed generation, Proceedings of 3rd International Symposium on Modern Electric Power Systems, September 6-8, 2006, Wroclaw, Poland
- [131]European Research Project MicroGrids [Online]. Available: <http://MicroGrids.power.ece.ntua.gr>.

发表论文和科研情况说明

发表的论文:

- [1] 王成山, 王丹, 郭金川, 基于网式链表-双层结构的电力系统时域仿真算法研究[J], 电力系统自动化, 2008, 32(16): 6-10 (EI: 083811572805)
- [2] 王丹, 王成山, 基于数值微分法求导的分布式发电系统仿真算法研究[J], 已录用. (EI 期刊)
- [3] *Dan WANG*, Ke PENG, Yan LI, Menghua FAN , Chengshan WANG, “Object-Oriented Analysis and Design of Transient Stability Simulation for Distributed Power Generation System[C], 1st_International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 6~7 April 2009, Nanjing, China.
- [4] Bibin Huang, Peng Li, *Dan Wang*, Fei Ding, Chengshan Wang, Modeling and Analysis of PEMFC in Distributed Generation System[C], 1st_International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 6~7 April 2009, Nanjing, China.
- [5] 王成山, 高毅, 王丹等, 考虑直流系统开关特性控制的变步长仿真算法[J], 中国电机工程学报, 已录用. (EI 期刊)
- [6] Menghua Fan, Venkataramana Ajjarapu, Chengshan Wang, *Dan Wang* and Cheng Luo, RPM Based Approach to Extract Power System Steady State and Small Signal Stability Information from the Time Domain Simulation (已投 IEEE Trans. on Power Systems).

参与的科研项目:

1. 美国电力科学研究院 (EPRI) 和天津大学联合开发 PSTSR 系统(Power System Transient Stability Region Program)数据支持平台 “暂态稳定仿真程序 (Transient Stability Simulation Program-TSSP)” 开发工作 (合同号: EP-P24225/C11739)
2. 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 “分布式发电供能系统相关基础研究” (项目编号: 2009CB219700)。
3. 国家级 863 重点资助项目 “兆瓦级冷热电联供分布式能源微网系统并网关技术与工程示范” (项目编号: 2007AA05Z250)

4. 国家自然科学基金杰出青年基金项目“分布式发电系统运行仿真与优化控制”（项目编号：50625722）
5. 教育部科学技术研究重大项目“分布式能源系统运行仿真与优化控制”（项目编号：306004）
6. 国家自然科学基金重大项目“电力系统广域安全防御基础理论及关键技术研究”子课题 2“电力系统多时标尺度的综合仿真算法与技术研究”（项目编号：50595412）

附录A分布式发电系统并网元件-网络接口计算

(一) 考虑凸极效应的同步电机机网接口

文献 [49]中推导的为不含有凸极效应的同步电机和三相不平衡电网的接口公式, 本附录主要推导了计及凸极效应情况的机网接口方法。设同步电机模型为 6 阶精细发电机模型, 且 $X_d'' \neq X_q''$ 。d-q 坐标系下的定子电压方程写成节点注入电流形式:

$$\begin{bmatrix} I_{gx} \\ I_{gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x & b_x \\ b_y & g_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d'' \\ E_q'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (\text{A-1})$$

式 (A-1) 中

$$\begin{aligned} g_x &= \frac{R_s \sin \delta - X_d'' \cos \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} & b_x &= \frac{R_s \cos \delta + X_q'' \sin \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} \\ b_y &= \frac{-R_s \cos \delta - X_d'' \sin \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} & g_y &= \frac{R_s \sin \delta - X_q'' \cos \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} \\ G_x &= \frac{R_s - (X_d'' - X_q'') \sin \delta \cos \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} & B_x &= \frac{X_d'' \cos^2 \delta + X_q'' \sin^2 \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} \\ B_y &= \frac{-X_d'' \sin^2 \delta - X_q'' \cos^2 \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} & G_y &= \frac{R_s + (X_d'' - X_q'') \sin \delta \cos \delta}{R_s^2 + X_d'' X_q''} \end{aligned}$$

δ 为发电机功角, 其他均为文中提到的发电机正序实用变量, 将其合成为相量形式 $\dot{I}_{g1} = I_{gx} + jI_{gy}$, $\dot{V}_{n1} = V_x + jV_y$, \dot{I}_{g1} 可以拆分为两部分:

- 1) 计及发电机凸极效应的等值电流源 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2$, 如式 (A-2) 所示, (\wedge) 表示复数取共轭。

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = Y_{11} \dot{E}'' \\ \dot{I}_2 = Y_{12} (\hat{E}'' - \hat{V}_{n1}) \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

式中: $Y_{11} = Y_G' = \frac{(r_a - j \frac{X_d'' + X_q''}{2})}{R_a^2 + X_d'' X_q''}$, $Y_{12} = j \frac{(\frac{X_d'' - X_q''}{2})}{R_a^2 + X_d'' X_q''} e^{j2\delta}$, $\dot{E}'' = E_q'' + jE_d''$, 且 $X_d'' = X_1$

- 2) 仅仅与电压有关, 为等值导纳部分, 如式 (A-3) 所示:

$$\dot{I}_3 = -\frac{(r_a - j \frac{X_d'' + X_q''}{2})}{R_a^2 + X_d'' X_q''} \dot{V}_{n1} = -Y_{11} \dot{V}_{n1} \quad (\text{A-3})$$

同步电机定子侧三序等值电路如下图 A-1 所示:

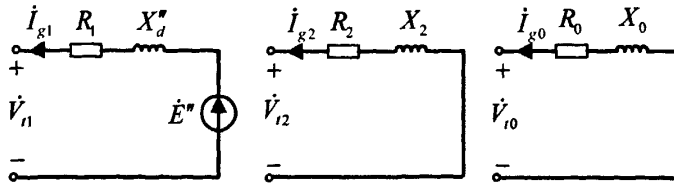


图 A-1 同步电机三序等值电路图

流经同步电机的三序电流表达式如式 (A-4):

$$\begin{cases} i_{g0} = -\dot{V}_{t0} / (R_0 + jX_0) \\ i_{g1} = (\dot{E}'' - \dot{V}_{n1}) / (R_1 + jX_1) \\ i_{g2} = -\dot{V}_{t2} / (R_2 + jX_2) \end{cases} \quad \text{s (A-4)}$$

写成矩阵形式为式 (A-5):

$$\begin{bmatrix} i_{g0} \\ i_{g1} \\ i_{g2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_0 & & \\ & Y_{11} & \\ & & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\dot{V}_{t0} \\ \dot{E}'' - \dot{V}_{n1} \\ -\dot{V}_{t2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ Y_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{E}'' - \hat{V}_{n1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-5})$$

或写成矩阵相量的形式:

$$\dot{\mathbf{i}}_g^{012} = \mathbf{Y}_1^{012} (\dot{\mathbf{E}}_g^{012} - \dot{\mathbf{V}}_t^{012}) + \mathbf{Y}_2^{012} (\hat{\mathbf{E}}_g^{012} - \hat{\mathbf{V}}_{n1}) \quad (\text{A-6})$$

$$\text{式中: } Y_0 = \frac{1}{R_0 + jX_0}, Y_2 = \frac{1}{R_2 + jX_2}, \mathbf{Y}_1^{012} = \begin{bmatrix} Y_0 & & \\ & Y_{11} & \\ & & Y_2 \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_2^{012} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & Y_{12} & \\ & & 0 \end{bmatrix},$$

$$\dot{\mathbf{E}}_g^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}'' \\ 0 \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{V}}_t^{012} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{t0} \\ \dot{V}_{t1} \\ \dot{V}_{t2} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{E}}_g^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{E}'' \\ 0 \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{V}}_{n1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{V}_{n1} \\ 0 \end{bmatrix}$$

利用对称分量法, 相分量与序分量可进行相互转化, 转换关系如式 (A-7) 所示:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (\text{A-7})$$

或者写成矩阵相量的形式:

$$\dot{\mathbf{i}}_g^{012} = \mathbf{A}^{-1} \dot{\mathbf{i}}_g^{abc}, \dot{\mathbf{V}}_t^{012} = \mathbf{A}^{-1} \dot{\mathbf{V}}_t^{abc} \quad (\text{A-8})$$

将式 (A-8) 代入 (A-6) 得式 (A-9):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{i}}_g^{abc} &= \mathbf{Y}_1^{abc} \dot{\mathbf{E}}_g^{*abc} + \mathbf{Y}_2^{abc} (\hat{\mathbf{E}}_g^{abc} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{V}}_{n1}) - \mathbf{Y}_1^{abc} \dot{\mathbf{V}}_t^{abc} \\ &= \dot{\mathbf{i}}_1^{gen} + \dot{\mathbf{i}}_2^{gen} - \mathbf{Y}_1^{abc} \dot{\mathbf{V}}_t^{abc} \end{aligned} \quad (\text{A-9})$$

式中 $\dot{\mathbf{i}}_1^{gen}, \dot{\mathbf{i}}_2^{gen}$ 为等值注入电流:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{I}}_1^{gen} = \mathbf{Y}_1^{abc} \dot{\mathbf{E}}_g^{abc} \\ \dot{\mathbf{I}}_2^{gen} = \mathbf{Y}_2^{abc} (\dot{\mathbf{E}}_g^{abc} - \mathbf{A} \hat{\mathbf{V}}_{t1}) \end{cases} \quad (\text{A-10})$$

$\mathbf{Y}_1^{abc} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_1^{012} \mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} Y_0 & & \\ & Y_{11} & \\ & & Y_0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^{-1}$ 为发电机恒定导纳矩阵, 可以并入系统导

纳之中, $\mathbf{Y}_2^{abc} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_2^{012} \mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} 0 & & \\ & Y_{12} & \\ & & 0 \end{bmatrix} \mathbf{A}^{-1}$ 是反映凸极效应的时变导纳矩阵,

$$\dot{\mathbf{E}}_g^{abc} = \mathbf{A} \dot{\mathbf{E}}_g^{012} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\mathbf{E}}' \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{V}}_t^{abc} = \mathbf{A} \dot{\mathbf{V}}_t^{012} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{V}_{t0} \\ \dot{V}_{t1} \\ \dot{V}_{t2} \end{bmatrix}.$$

(二) 鼠笼式异步电机机网接口

与同步电机相类似, 异步电机的机网接口也可以采用上述方法, 笼型感应电机可看作是同步电机的特例, 即励磁电压恒为零, d 轴、q 轴参数相等, 转速为非同步速, 笼形感应电机实用模型的等效电路采用发电机惯例, 电流方向以流入网络为正。与同步电机不同, 笼型感应电机一般采用 Y 型不接地接线方式, 因此转子绕组不存在零序电路, 即整个模型不考虑零序电路, 如图 A-2 所示。

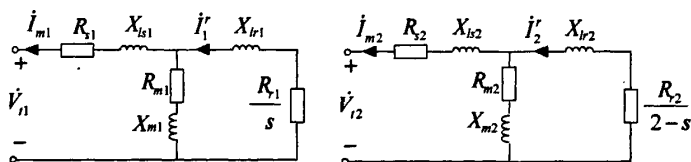


图 A-2 单鼠笼感应电机的正序、负序稳态等效电路

由于鼠笼型异步电动机的 d 轴和 q 轴参数具有对称性, 无需坐标变换, 将三序定子电压平衡方程写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{m0} \\ \dot{I}_{m1} \\ \dot{I}_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & Y_1 & \\ & & Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\mathbf{E}}' - \dot{V}_1 \\ -\dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A-11})$$

或者写成矩阵相量的形式: $\dot{\mathbf{I}}_m^{012} = \mathbf{Y}_m^{012} (\dot{\mathbf{E}}_m^{012} - \dot{\mathbf{V}}_t^{012})$ (A-12)

$$\text{式中 } \dot{\mathbf{E}}_g^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\mathbf{E}}' \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Y_1 = \frac{1}{R_{s1} + j(X_{ls1} + X_{m1} // X_{lr1})}, \quad Y_2 = \frac{1}{R_{s2} + j(X_{ls2} + X_{m2} // X_{lr2})},$$

$\mathbf{Y}_m^{012} = \begin{bmatrix} 0 & & \\ & Y_1 & \\ & & Y_2 \end{bmatrix}$ 为笼形感应电机的序导纳矩阵, 且 $\dot{E}' = E'_q + jE'_d$, E'_q, E'_d 为电动机暂态电势。

利用对称分量法, 将式 (A-13) 转化为相分量形式:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_m^{abc} &= \mathbf{Y}_m^{abc} \dot{\mathbf{E}}_m^{abc} - \mathbf{Y}_m^{abc} \dot{\mathbf{V}}_t^{abc} \\ &= \dot{\mathbf{I}}_1^{mot} - \mathbf{Y}_m^{abc} \dot{\mathbf{V}}_t^{abc} \end{aligned} \quad (\text{A-13})$$

式中 $\mathbf{Y}_m^{abc} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_m^{012} \mathbf{A}^{-1}$ 为笼形感应电机等值导纳矩阵, 可以并入系统导纳之中, $\dot{\mathbf{I}}_1^{mot} = \mathbf{Y}_m^{abc} \dot{\mathbf{E}}_m^{abc}$ 为等值注入电流源。

(三) PWM 换流器机网接口

分布式发电系统中普遍采用电压源型 PWM 换流器, 电路结构可用图 10 表示。图 A-3 中 R_f, X_f, C_f 为逆变器调制电压出口处 LC 滤波电路参数, $\dot{E}_a^{PWM}, \dot{E}_b^{PWM}, \dot{E}_c^{PWM}$ 为换流器调制内电势, $\dot{V}_t^a, \dot{V}_t^b, \dot{V}_t^c$ 为并网端母线电压。

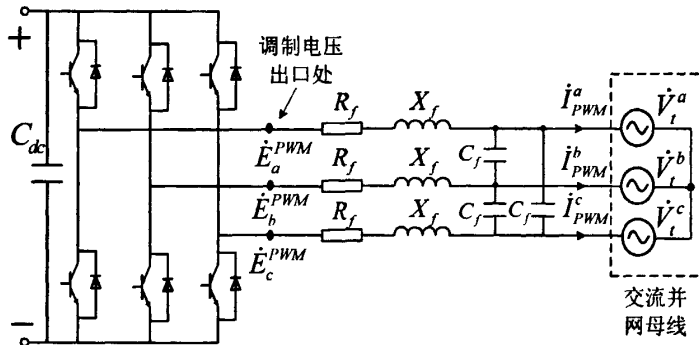


图 A-3 PWM 换流器电路结构图

PWM 换流器的接网模型和同步发电机类似, 可以采用出口滤波线路正序、负序、零序电路^[55]表示, 如图 A-4。

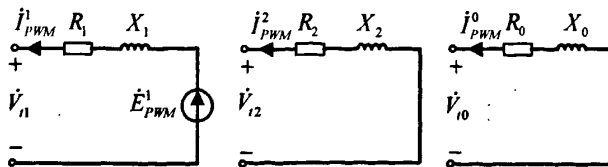


图 A-4 馈线电路稳态序网图

设图 10 中每一相滤波电路等值阻抗为 $R_{PWM} + jX_{PWM}$, 考虑到参数平衡, 则可令

$R_1 = R_2 = R_0 = R_{PWM}$, $X_1 = X_2 = X_0 = X_{PWM}$, 类似于发电机, 逆变器出口处可以类比于其定子侧进行处理, 忽略电磁暂态过程, 其出口处电压平衡方程可以写为式 (A-15):

$$\begin{cases} E_{PWM}^q = V_{iq} + R_{PWM} I_{PWM}^q + X_{PWM} I_{PWM}^d \\ E_{PWM}^d = V_{id} + R_{PWM} I_{PWM}^d - X_{PWM} I_{PWM}^q \end{cases} \quad (A-14)$$

将式 (A-15) 写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} V_{id} \\ V_{iq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{PWM}^d \\ E_{PWM}^q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{PWM} & -X_{PWM} \\ X_{PWM} & R_{PWM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{PWM}^d \\ I_{PWM}^q \end{bmatrix} \quad (A-15)$$

如果该注入电流需要和正序同步坐标系进行接口, 需要采用坐标变换, 和传统发电机并网接口不同, 逆变器的坐标变换采用的角度是 V_{α}, V_{β} 之间的夹角 θ 。

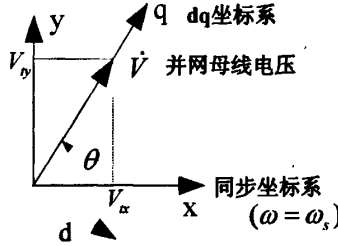


图 A-5 馈线电路稳态序网图

将式 (A-16) 两边同乘以 $T = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}$, 正序注入电流分量为:

$$\begin{bmatrix} I_{PWM}^x \\ I_{PWM}^y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_x & b_x \\ b_y & g_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{PWM}^d \\ E_{PWM}^q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x & B_x \\ B_y & G_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (A-16)$$

式中 $V_{\alpha}^d, V_{\beta}^d, I_{PWM}^d, I_{PWM}^q$ 为逆变器并网点端母线电压和注入电流 dq 分量, 且

$$g_x = \frac{R_{PWM} \sin \theta - X_{PWM} \cos \theta}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2} \quad b_x = \frac{R_{PWM} \cos \theta + X_{PWM} \sin \theta}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2}$$

$$b_y = \frac{-R_{PWM} \cos \theta - X_{PWM} \sin \theta}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2} \quad g_y = \frac{R_{PWM} \sin \theta - X_{PWM} \cos \theta}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2}$$

$$G_x = \frac{R_{PWM}}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2} \quad B_x = \frac{X_{PWM}}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2} \quad B_y = \frac{-X_{PWM}}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2} \quad G_y = \frac{R_{PWM}}{R_{PWM}^2 + X_{PWM}^2}$$

其合成为相量形式 $\dot{I}_{PWM}^1 = I_{PWM}^x + j I_{PWM}^y, \dot{V}_{i1} = V_{\alpha} + j V_{\beta}$, 流经换流器的三序电流如式 (A-14):

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{PWM}^0 \\ \dot{I}_{PWM}^1 \\ \dot{I}_{PWM}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{PWM}^0 & & \\ & Y_{PWM}^1 & \\ & & Y_{PWM}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}_{PWM}^1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{PWM}^0 & & \\ & Y_{PWM}^1 & \\ & & Y_{PWM}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{i0} \\ \dot{V}_{i1} \\ \dot{V}_{i2} \end{bmatrix} \quad (A-17)$$

写成相量形式:

$$\dot{\mathbf{I}}_{PWM}^{012} = \mathbf{Y}_{PWM}^{012} (\dot{\mathbf{E}}_{PWM}^{012} - \dot{\mathbf{V}}_i^{012}) \quad (\text{A-18})$$

其中PWM调制电势 $\dot{E}_{PWM}^1 = E_q^{PWM} + jE_d^{PWM}$, E_q^{PWM}, E_d^{PWM} 为dq调制分量, 由直流侧直流电容 C_{dc} 的电压和换流器控制器决定。

$$Y_{PWM}^0 = Y_{PWM}^1 = Y_{PWM}^2 = \frac{1}{R_{PWM} + jX_{PWM}},$$

$$\mathbf{Y}_{PWM}^{012} = \begin{bmatrix} Y_{PWM}^0 & & \\ & Y_{PWM}^1 & \\ & & Y_{PWM}^2 \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{E}}_{PWM}^{012} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}_{PWM}^1 \\ 0 \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{V}}_i^{012} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{i0} \\ \dot{V}_{i1} \\ \dot{V}_{i2} \end{bmatrix}$$

采用对称分量变换后得到:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{I}}_{PWM}^{abc} &= \mathbf{Y}_{PWM}^{abc} \dot{\mathbf{E}}_{PWM}^{abc} - \mathbf{Y}_{PWM}^{abc} \dot{\mathbf{V}}_i^{abc} \\ &= \dot{\mathbf{I}}_1^{PWM} - \mathbf{Y}_{PWM}^{abc} \dot{\mathbf{V}}_i^{abc} \end{aligned} \quad (\text{A-19})$$

式中 $\mathbf{Y}_{PWM}^{abc} = \mathbf{A} \mathbf{Y}_{PWM}^{012} \mathbf{A}^{-1}$, $\dot{\mathbf{E}}_{PWM}^{abc} = \mathbf{A} \dot{\mathbf{E}}_{PWM}^{012}$, 其中 $\mathbf{Y}_{PWM}^{abc} \dot{\mathbf{V}}_i^{abc}$ 仅与电压有关, \mathbf{Y}_{PWM}^{abc} 为 PWM 换流器的等值导纳矩阵, 可并入系统三相节点导纳矩阵, 等值电流源为

$$\dot{\mathbf{I}}_1^{PWM} = \mathbf{Y}_{PWM}^{abc} \dot{\mathbf{E}}_{PWM}^{abc}.$$

附录B 400V低压分布式发电系统仿真测试系统

(一) 逆变器主导型分布式发电系统稳定性仿真测试算例

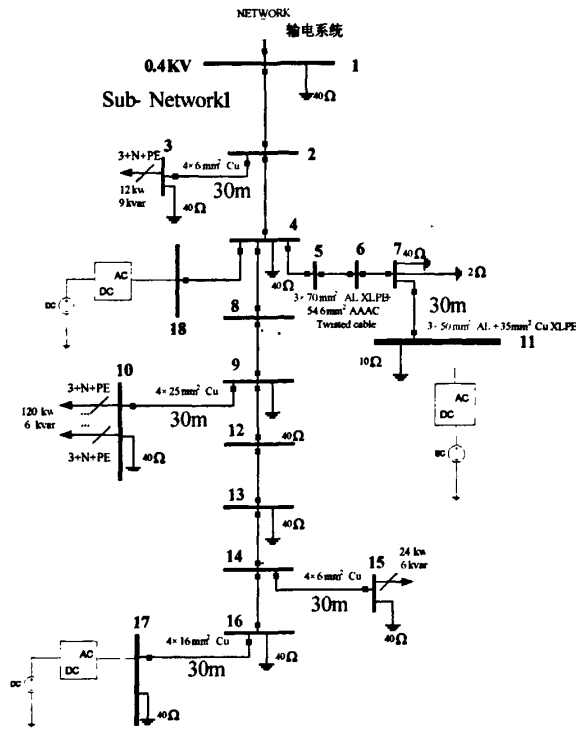


图 B-1 算例 1 测试系统接线图

表 B-1 发电机数据

节点号	Phase A		Phase B		Phase C	
	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)
1	18.01258	7.574403	18.01258	7.574403	18.01258	7.574403
11	20.00000	0.00000	20.00000	0.00000	20.00000	0.00000
17	14.00000	0.00000	14.00000	0.00000	14.00000	0.00000
18	3.33333	0.00000	3.33333	0.00000	3.33333	0.00000

表 B-2 负荷数据

节点号	Phase A		Phase B		Phase C	
	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)
3	4.00000	3.0000	6.00000	3.0000	2.00000	3.0000

10	40.00000	2.0000	60.00000	2.0000	20.00000	2.0000
15	8.00000	2.0000	10.00000	2.0000	6.00000	2.0000

表 B-3 线路有名值数据

节点号	节点号	R1	X1	R0	X0	l(长度)
From	To	$ \Omega/\text{km} $	$ \Omega/\text{km} $	$ \Omega/\text{km} $	$ \Omega/\text{km} $	(km)
1	2	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
2	4	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
4	5	0.497	0.086	2.387	0.447	0.035
5	6	0.497	0.086	2.387	0.447	0.035
6	7	0.497	0.086	2.387	0.447	0.035
4	8	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
8	9	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
9	12	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
12	13	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
13	14	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
14	16	0.284	0.083	1.136	0.417	0.035
2	3	3.690	0.094	13.64	0.472	0.030
4	18	1.380	0.082	5.520	0.418	0.030
7	11	0.822	0.077	2.040	0.421	0.030
9	10	0.871	0.081	3.480	0.409	0.030
14	15	3.690	0.094	13.64	0.472	0.030
16	17	1.380	0.082	5.520	0.418	0.030

表 B-4 测试系统三相潮流数据

节点号	Phase A		Phase B		Phase C	
	幅值(p.u.)	相角(p.u.)	幅值(p.u.)	相角(p.u.)	幅值(p.u.)	相角(p.u.)
1	1.000000	0.000000	1.000000	-120.000000	1.000000	120.000000
2	0.995649	0.225872	0.991063	-120.170085	1.001989	120.017603
3	0.986990	0.957546	0.972416	-120.015949	1.003470	120.181864
4	0.992479	0.395674	0.983904	-120.324810	1.003814	120.016504
5	0.999125	0.354487	0.992692	-120.184988	1.007509	120.113382
6	1.005771	0.313844	1.001485	-120.047621	1.011207	120.209551
7	1.012418	0.273735	1.010283	-119.912646	1.014908	120.305020
8	0.984067	0.636126	0.969411	-120.691617	1.005478	119.932582
9	0.975673	0.880720	0.954959	-121.069542	1.007143	119.848936
10	0.954539	1.919565	0.907116	-121.821659	1.013994	119.382861
11	1.021721	0.268498	1.021414	-119.823114	1.021631	120.365129
12	0.977300	0.822052	0.958038	-120.934119	1.005240	119.897781
13	0.978928	0.763580	0.961122	-120.799564	1.003337	119.946812
14	0.980557	0.705301	0.964211	-120.665871	1.001435	119.996028
15	0.963440	1.341619	0.935810	-120.642182	0.994830	120.009300
16	0.984075	0.610380	0.969911	-120.488963	1.000029	120.051597
17	0.995702	0.079101	0.995003	-120.155307	0.995994	120.369904
18	0.995921	0.017190	0.995616	-120.117522	0.996427	120.217140

表 B-5 恒 PQ 控制逆变器控制参数

T_{Pm} (s)	T_{Qm} (s)	K_P	T_P (s)	K_q	T_q (s)	K_Q	T_Q (s)	K_d	T_d (s)
0.01	0.01	1.5	0.08	0.2	0.01	0.5	0.08	0.2	0.01

表 B-6 下垂控制逆变器控制参数

K_f	K_v	T_{Pm} (s)	T_{Qm} (s)	K_P	T_P (s)	K_q	T_q (s)	K_Q	T_Q (s)	K_d	T_d (s)
1	10	0.01	0.01	0.8	0.05	0.1	0.01	0.8	0.05	0.1	0.01

表 B-7 恒频恒压控制逆变器控制参数

T_{fp} (s)	T_{fq} (s)	K_P	T_{ip} (s)	K_q	T_q (s)	K_Q	T_{iq} (s)	K_d	T_d (s)
0.01	0.01	0.6	0.05	0.2	0.01	0.6	0.05	0.2	0.01
K_f	T_f (s)	K_v	T_v (s)						
1.0	0.3	10	0.08						

(二) 数值微分求导的隐式交替求解算法的验证算例

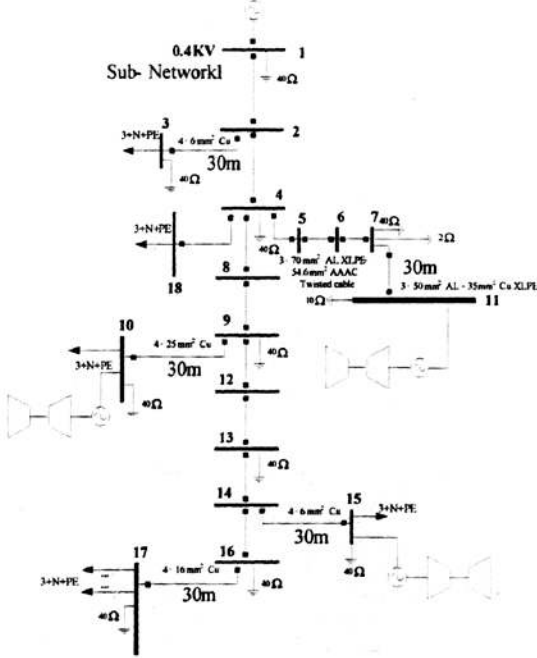


图 B-2 算例 2 测试系统接线图

表 B-8 发电负荷有功、无功数据

节点号.	发电有功(Kw)	发电无功(Kvar)	负荷有功(Kw)	负荷无功(Kvar)
1	74	33	/	/
3	/	/	12	9
10	20	10	42	24
11	20	10	/	/
15	30	20	12	9
17	/	/	42	24

18	/	/	33	6
----	---	---	----	---

表 B-9 发电机动态参数

bus1		bus10		bus11		bus15	
<i>H</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>H</i>	<i>D</i>
30.80	60.00	15.00	50.00	13.80	45.00	13.80	45.00

表 B-10 分轴燃气轮机动态参数

<i>R</i>	<i>T</i> ₁ (s)	<i>T</i> ₂ (s)	<i>T</i> ₃ (s)	<i>L</i> _{lim}
1000	33.00	1.00	4.50	0.0001
<i>K</i> _{<i>T</i>}	<i>V</i> _{MAX}	<i>V</i> _{MIN}	<i>D</i> _{turb}	
20	1.00	-0.10	0.00	

注：线路参数和算例 1 相同

（三）含分布式电源动态模型的仿真测试算例

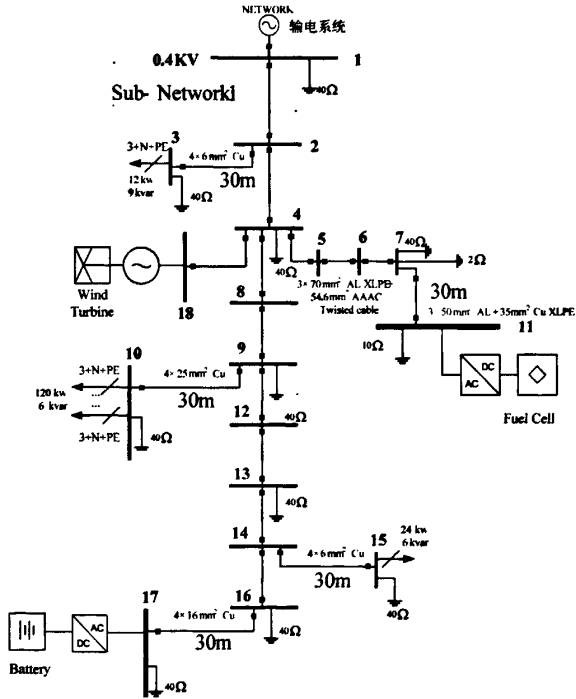


图 B-3 算例 3 测试系统接线图

表 B-11 发电机数据

节点号	Phase A		Phase B		Phase C	
	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)
1	11.333563	7.55702	11.333563	7.55702	11.333563	7.55702
11	20.00000	0.00000	20.00000	0.00000	20.00000	0.00000
17	14.00000	0.00000	14.00000	0.00000	14.00000	0.00000

18	10.00000	0.00000	10.00000	0.00000	10.00000	0.00000
----	----------	---------	----------	---------	----------	---------

表B-12 负荷数据

节点号	Phase A		Phase B		Phase C	
	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)	P (Kw)	Q (Kvar)
3	4.00000	3.0000	6.00000	3.0000	2.00000	3.0000
10	40.00000	2.0000	60.00000	2.0000	20.00000	2.0000
15	8.00000	2.0000	10.00000	2.0000	6.00000	2.0000

表 B-13 潮流数据

节点号	Phase A		Phase B		Phase C	
	幅值(p.u.)	相角(p.u.)	幅值(p.u.)	相角(p.u.)	幅值(p.u.)	相角(p.u.)
1	1.000000	0.000000	1.000000	-120.000000	1.000000	120.000000
2	0.996894	0.245758	0.992326	-120.148808	1.003219	120.038486
3	0.988245	0.975574	0.973704	-119.995098	1.004698	120.202388
4	0.994968	0.435196	0.986427	-120.281590	1.006275	120.058163
5	1.001599	0.394257	0.995192	-120.142458	1.009963	120.154509
6	1.008231	0.353856	1.003962	-120.005756	1.013654	120.250154
7	1.014863	0.313983	1.012737	-119.871422	1.017347	120.345105
8	0.986577	0.674306	0.971981	-120.646480	1.007933	119.974817
9	0.978204	0.917515	0.957575	-121.022365	1.009593	119.891744
10	0.957116	1.950533	0.909880	-121.770433	1.016421	119.428552
11	1.024144	0.308780	1.023839	-119.782297	1.024055	120.40489
12	0.979828	0.859198	0.960644	-120.887653	1.007695	119.940299
13	0.981453	0.801075	0.963718	-120.753800	1.005799	119.989036
14	0.983079	0.743143	0.966798	-120.620799	1.003903	120.037958
15	0.966005	1.376016	0.938479	-120.597312	0.997313	120.051373
16	0.986589	0.648770	0.972481	-120.444810	1.002504	120.093181
17	0.998192	0.120327	0.997499	-120.112670	0.998485	120.409522
18	1.003548	0.076392	1.003245	-120.056821	1.004054	120.274225

表 B-14 燃料电池并网系统动态数据

并网逆变器	T_{fP} (s)	T_{fQ} (s)	K_P	T_{iP} (s)	K_q	T_{iq} (s)	K_Q	T_{iQ} (s)	K_d	T_{d} (s)
	0.01	0.01	0.8	0.05	0.2	0.01	0.8	0.05	0.2	0.01
燃料电池堆	T_{H_2} (s)	K_{H_2}	T_{H_2O} (s)	K_{H_2O}	T_{O_2} (s)	K_{O_2}	r_{H_2O}	K_r	U_s	T_e (s)
	26.1000	0.8430	78.300	0.2810	2.9100	2.5200	1.1450	0.9930e-3	0.8500	0.8500
	T_f (s)	U_{max}	U_{min}	r	N_0	E_0	R	T	F	P_{rated}
	5.000	0.9000	0.8000	0.1260	384.00	1.18000	8.3140	1273.00	96487.0	6666.67
	V_{rated}	N_s								
		266.6667	3							

表 B-15 风力发电并网系统动态数据

轴系 参数	P_{base}	D_{turb}	J_{turb}	K_{shaft}	D_{shaft}	ω_{turb0} (转/分钟)					
	0.03	0.00	4.00	1000000 0	0.00	18.75					
桨矩 控制	ω_{shaft0}	K_a	T_r (s)	T_a (s)	V_{max}	V_{min}	T (s)	θ_{max}	θ_{min}	θ_{ref_max}	θ_{ref_min}
	1.05	500	5.00	1.00	70	0.00	0.50	15	-15	70	0
风机 参数	R (m)	ρ (kg/m ³)									
	20	1.225									

表 B-16 蓄电池并网系统动态数据

K_f	K_v	T_{fp} (s)	T_{fq} (s)	K_p	T_{ip} (s)	K_q	T_{iq} (s)	K_Q	T_{iQ} (s)	K_d	T_d (s)
1	10	0.01	0.01	0.8	0.05	0.1	0.01	0.8	0.05	0.1	0.01

注： 线路参数和算例 1 相同

致 谢

本论文的工作是在我的导师王成山教授的悉心指导下完成的，自 2006 年进入实验室至今，三年间导师在学习上的循循善诱、工作上的谆谆教诲、生活上的关心帮助，令我终生难忘，导师渊博精深的学识、敏锐深邃的思维、严谨务实的作风以及乐观积极的人生态度都深深地影响着我，仰之弥高，钻之弥坚。师恩如山，在此谨向恩师表示深深的敬意和诚挚的感谢！

在学期间承蒙余贻鑫院士和黄纯华教授对我的热心指导和帮助，二位老师严谨的学风和一丝不苟的工作态度，以及平易近人的学者风范，始终为我辈所景仰，在此表示由衷的感谢。

感谢 The Queen's University of Belfast 的王海风教授以及天津大学房大中教授，引领我进入天津大学电气与自动化工程学院攻读博士学位，教授先生们严谨的学风和勤恳的工作态度，以及平易近人的学者风范是我终身学习的榜样，在此谨向两位老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

感谢曾沅博士、EPRI 的张沛博士、张家安博士引领我进入电力系统动态仿真领域的研究。感谢杨晓东博士以及远在 Iowa State University 的范孟华同学在课题研究、论文写作方面给予我的帮助。

感谢葛少云教授、贾宏杰教授、魏炜博士、李斌博士、孙强博士三年多时光里在各方面给予我的关心和帮助。

在参与分布式发电课题组工作及撰写论文期间，王守相教授、李鹏、高毅、彭克、李琰、肖朝霞、马力、黎鹏、黄碧斌、高菲、高群、丁菲、武震等同学对我论文的研究工作给予了热情的帮助，在此向他们表达我的感激之情。

感谢曾经和现在与我共同在实验室为自己理想而奋斗的前辈和可爱的同窗们，他（她）们是王东涛博士、王艳君博士、王兴刚博士、赵金利博士、宋毅博士、张文涛博士、杨明海、徐臣、王菲、袁世强、李盛伟、罗凤章、宋鹏、谷鑫、李志强、蒲成、李菲、沈虹、邢娟、刘文静、刘涛、冯兆飞、覃岭等同学。

谨以此文献给我深爱着的父母，是他们牵着我的手，第一次，走进学堂。