

摘要

由于传统的电力系统暂态稳定分析方法存在一些不可避免的缺陷，因此使得电力系统的暂态稳定分析在精度和速度方面很难有较大的突破。随着近年来非线性系统理论的发展，很多学者开始将一些非线性系统的新理论广泛用于电力系统中，获得了很多好的成果。

本文在分析了电力系统暂态过渡过程的基础上，在采用 Normal Form 变换方法分析电力系统的暂态稳定性方面进行了深入的研究，通过 Normal Form 变换，可以将原系统主导不稳定平衡点附近的稳定边界映射到 Z 空间，并形成该空间中的一个超平面 $z_i=0$ （其中 i 对应于唯一的正特征值），由于描述原系统的微分方程组经过 Normal Form 变换后将化为 Z 空间中的线性系统微分方程组，所以各变量可解析表达，再利用 Normal Form 反变换则可以得到原系统空间中各变量的解析表达式，它是关于变量 z_1, z_2, \dots, z_n 的代数方程组，又由于稳定边界对应于 $z_i=0$ ，所以原系统空间中的局部稳定边界可求。在单机无穷大系统中，这个稳定边界和暂态能量函数法所求的稳定边界在主导不稳定平衡点附近是一致的，所以 Normal Form 变换方法在确定局部稳定边界方面是很有效的。

求得电力系统的稳定边界后，本文提出了通过判断持续故障轨迹何时和稳定边界相交来求临界切除时间的方法，这种方法在理论上可行，在计算结果上比较有效。计算出电力系统发生故障时的临界切除时间后，根据它与实际切除时间的比较就可以判断系统在故障切除后是否能稳定运行。同时，还可以得到时间裕度，用时间作为电力系统稳定裕度的度量比用能量度量更加直观，对于运行人员而言容易接受，并且能使他们对电力系统的运行状态有一个较清晰的认识。

关键词：电力系统暂态稳定 稳定边界 持续故障轨迹 临界切除时间
时间裕度

Abstract

The traditional methods of transient stability analysis have some inevitable flaw in power system, so the analysis has seldom great breakout in precision and velocity. With the development of nonlinear system theory recently, many scholars applied new theories in nonlinear system to power system and acquired some achievements.

Based on the analysis of transient transition procedure of power system, this paper makes in-depth research in applying Normal Form method to analyzing power system transient stability. By means of Normal Form, original system stability boundary near controlling unstable equilibrium can be varied into Z space, and become a super-plane $z_i=0$ (i corresponds to the unique positive eigenvalue). Because Normal Form method can transform differential equation array that described original system into differential equation array of linear system in Z space, each variable may be expressed analytically. Then, every variable's analytical expression in original system space can be obtained by means of Normal Form method and they are algebraic equation array about variable $z_1, z_2 \dots z_n$. In addition, stability boundary corresponds to formula $z_i=0$, therefore, the local stability boundary in original system space can be gained. In a one-machine infinite-bus system, the stability boundary accords with that acquired by means of Transient Energy Function method near the controlling unstable equilibrium, so Normal Form method is very valid on determining stability boundary.

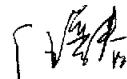
The paper also presents a method of determining the critical clearing time by judging when trajectory on fault will intersect with stability. This method is feasible in the theory and is valid in the result. If a fault happens in power system, when we acquire its critical clearing time, by comparing this time with actual clearing time, we may judge whether power system can be stably in operation after the fault is cleared. Moreover, we can obtain time abundance, which is intuitive in measuring stability abundance of power

system, in contrast to energy abundance. Therefore, operators can accept it easily, and they will be clear aware of operation state of power system.

Key words: Power system transient stability, Stability boundary, Trajectory on fault, Critical clearing time, Time abundance

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。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谢意。

学位论文作者签名： 

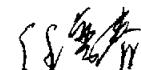
日期： 2005.8

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北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、交流。

学位论文作者签名： 
日期： 2005.8

另外，如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。

学位论文作者签名： 

导师签名： 于锡纯

签字日期： 2005.8

签字日期： 2005.8

第1章 绪论

1.1 引言

由于社会经济以及科学技术的飞速发展，使得现代电力系统的发展呈现出两个明显的趋势：一是大容量远距离输电系统的不断开发建设；二是以九十年代以来正逐步得以实现的西欧和原东欧国家之间的电网的互连等为代表的大型电力系统的联网输电趋势正日益显现。随着我国三峡工程的顺利进展和国家对城乡电网改造的大规模投资，以全国联网为目标的跨省跨区电网互联正在加速进行，全国多数跨省电网已基本形成了以 500kv 输电网为主干的网络结构。同时电力市场改革不断深入，一个“厂网分开，竞价上网”的开放式电力市场正在形成。如此的发展趋势在给电力系统以巨大的技术和经济方面益处的同时，也使得稳定性破坏事故所波及的范围更加广泛，造成的危害更加严重，这就给我们提出了新的挑战：一是电源建设与电网建设的不同步，使得系统的稳定性较弱，严重限制了电力的供给，例如：黑龙江东部电力的供远大于求，需要大量外送，但由于电网建设的落后，使东部网在电力大量外送时，稳定性极差，大大限制了电力外送；东北华北联网以后，由于网架结构薄弱，使得不仅在发生大扰动时不能互为支援，反而稳定性变差。二是电力市场的日益开放使运行方式更加灵活多变，对实时性要求更高。因此，准确地分析电力系统在大扰动下的暂态稳定行为，快速精确地计算出临界切除时间，并确定适当的对策，以保证系统对暂态稳定性的要求，是电力系统设计以及运行人员最重要也是最复杂的任务之一。

电力系统暂态稳定性的一般定义为：对于系统的某个指定的初始运行点和指定的大扰动（某种故障），如果扰动过后，系统状态能抵达一个可以接受的运行点，则系统的这个初始运行点在指定的扰动下是暂态稳定的；否则，是暂态不稳定的^[1]。电力系统一旦失去暂态稳定性，轻则造成大面积停电，重则导致系统崩溃瓦解，对电力系统乃至社会生活无疑是一场灾难。因此，电力系统暂态稳定问题是电力科学工作者关心的最重要的

问题之一。

由于电力系统的暂态稳定性与系统的运行状态、故障状态、电网的结构与参数以及系统中的多种安全自动装置的作用等方面的因素密切相关，加之现代电力系统规模日益庞大，因此电力系统暂态稳定性的问题是一个非常复杂的问题，这一领域的研究吸引了大批电力工作者，成为电力系统研究中的一个经久不衰的研究领域。

1.2 电力系统暂态稳定分析传统方法概述

从数学的意义上讲，电力系统的暂态稳定性分析就是分析由初值 $X = X_0$ ， $Y = Y_0$ 所确定的形如：

$$\begin{cases} \dot{X} = \Phi(X, Y) \\ 0 = F(X, Y) \end{cases} \quad (1.1a)$$

$$(1.1b)$$

的代数—微分方程组的解的稳定性。其中描述系统动态过程的状态变量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，系统中的代数变量 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ，系统函数矩阵 $\Phi = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)$ ，代数关系函数矩阵 $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ 。式(1.1a)表示描述系统有关元件（如转子、励磁调节器、调速器等）动态特性的微分方程，式(1.1b)表示电力网络的代数方程（当忽略网络的电磁暂态过程时，网络的作用可用一组代数方程组来描述）。 X ， Y 分别表示电力系统有关元件的内部状态参数以及电力网络的运行参数。由于正常运行、故障、故障被切除这三个时段系统的网络结构、元件的动态特性或所考虑的元件的类型等都不一样，所以在不同时段， Φ 和 F 在其具体表达式和内容上都不是一成不变的，并且 Φ 和 F 一般都是比较复杂的非线性函数，所以很难求出微分方程(1.1a)的解析解。

迄今为止，研究由方程(1.1a)和(1.1b)所描述的电力系统暂态稳定问题的方法主要有三类：一类是数值仿真法；另一类是基于 Lyapunov 稳定性理论的直接法；还有则是数值仿真法与直接法相结合的混合法。

1.2.1 数值仿真法

数值仿真法是利用某种数值解法，以系统的潮流解为计算初值，对描述电力系统机电暂态过程的微分—代数方程组进行迭代求解，得到对应某一故障序列的系统状态量的时间响应^[2]，即对电力系统的机电暂态过程进行数值仿真，然后根据仿真结果来分析在指定扰动下的系统的暂态稳定性。

数值仿真法的一个突出的优点是：它对电力系统模型有很强的适应性。电力系统中的任何元件只要可以用微分方程或代数方程描述其特性，原则上都可以在用数值仿真法计算暂态过程时计及该元件的作用，目前已有的数值仿真程序已经达到可以计算包含几千条线路、几千条母线、几百台发电机的规模。数值仿真法还有算法原理简单，便于程序实现的优点。由于数值仿真法的这些优点，使得基于这类方法的暂稳计算程序已被电力系统的调度运行部门普遍接受。根据仿真法所得到的暂稳计算结果已经是运行部门所公认的制定运行规范和稳定措施的依据。借助于数值仿真程序还可以得到电力系统机电暂态过程的详细信息。这是数值仿真法的另一个优点。

数值仿真法的主要缺点是：数值仿真程序虽然可以提供电力系统机电暂态过程中系统状态量的详细变化信息，但程序本身并不具备分析系统暂态稳定性的功能，只能通过观察扰动后发电机转子角度随时间的变化曲线，即摇摆曲线来判断系统是否稳定，不能对系统的暂态稳定性进行定量的评价。另外，为了保证仿真过程中的数值稳定性，必须采用较小的计算步长，从而增加了数值仿真法的计算量，此外，由于缺乏可靠的暂态稳定终止判据，使得采用数值仿真法的暂态稳定分析只能依赖于对较长时段的暂态过程进行仿真才能得到可靠的结果，导致数值仿真法的计算速度较慢。

为了克服数值仿真法的不足，电力工作者在数值仿真的算法以及终止判据方面进行了大量的研究。夏道止^[3]利用系统状态变量的高阶导数信息提出了一种“分解-聚结”的积分步骤。郭志忠提出了基于高阶 Taylor 级数的数值计算方法^[4]。文献[5]试图用并行计算的方法实现仿真速度的大幅度提高。文献[6][7]则利用暂态能量函数的概念提出了暂态稳定快速数值仿真终止判据，减少了数值仿真的计算量。但是随着电力系统不断扩大和日

趋复杂,运行部门对暂稳分析计算的要求不断提高,依靠运行人员来分析暂稳程序输出结果的现状远远不能适应系统运行的需要。

1.2.2 直接法

直接法又称 Lyapunov 第二方法,是常微分方程稳定性分析理论的重要组成部分。其主要思想是对可以用微分方程描述的自治系统构造一个 Lyapunov 函数 $V(x)$,借助于这个 $V(x)$ 函数确定出一族稳定的解所共有的初始条件 x^0 的集合,即稳定域 D ,只要给定系统的初值 x^0 ,即可直接的判断系统是否稳定,而不必依赖微分方程的任何解,因此称为直接法。

直接法的分析过程包括三个基本步骤:①针对电力系统的模型及结构定义一个反映系统稳定性的能量型 Lyapunov 函数 V ;②根据故障过程及故障后的最终网络结构,确定相应于该故障 Lyapunov 的函数的临界值 V_{cr} ;③积分故障时的系统方程直到 $V(t)=V_{cr}$,此时的时间即为临界切除时间;或者求出系统最后一次操作的暂态能量 V_{ct} ,若 $V_{ct} < V_{cr}$,则认为系统稳定,反之则认为系统不稳定,并可将 $V_{ct}-V_{cr}$ 作为暂态稳定裕度的度量。实际应用中常使用稳定裕度的概念。近十多年来直接法应用中大多基于能量裕度的概念。

应用直接法分析系统稳定性的要点是需要构造一个能够反映系统稳定情况并符合规定的 Lyapunov 函数 $V(x)$,同时还要确定一个和稳定域边界(临界条件)相应的函数值 V_{cr} ,将扰动后的 $V(x)$ 与 V_{cr} 进行比较,若 $V(x) < V_{cr}$,则系统是暂态稳定的;反之,系统是暂态不稳定的。

直接法的一个显著优点是它可以给出系统稳定程度的指标。这种稳定性指标对于分析系统的稳定状况及指导系统的运行都是非常有用的。直接法的另一个优点是它具有快速计算的潜力,有可能发展成为在线暂稳分析的工具。

直接法的缺点是:对电力系统模型的适应能力较差,迄今仅在经典模型第一摆暂态稳定分析中得到了成功的实际应用。

早期阶段的直接法在多机系统中的应用遇到了“保守性”的困扰。这

趋复杂, 运行部门对暂稳分析计算的要求不断提高, 依靠运行人员来分析暂稳程序输出结果的现状远远不能适应系统运行的需要。

1.2.2 直接法

直接法又称 Lyapunov 第二方法, 是常微分方程稳定性分析理论的重要组成部分。其主要思想是对可以用微分方程描述的自治系统构造一个 Lyapunov 函数 $V(x)$, 借助于这个 $V(x)$ 函数确定出一族稳定的解所共有的初始条件 x^0 的集合, 即稳定域 D , 只要给定系统的初值 x^0 , 即可直接的判断系统是否稳定, 而不必依赖微分方程的任何解, 因此称为直接法。

直接法的分析过程包括三个基本步骤: ①针对电力系统的模型及结构定义一个反映系统稳定性的能量型 Lyapunov 函数 V ; ②根据故障过程及故障后的最终网络结构, 确定相应于该故障 Lyapunov 的函数的临界值 V_{cr} ; ③积分故障时的系统方程直到 $V(t)=V_{cr}$, 此时的时间即为临界切除时间; 或者求出系统最后一次操作的暂态能量 V_{ct} , 若 $V_{ct} < V_{cr}$, 则认为系统稳定, 反之则认为系统不稳定, 并可将 $V_{ct}-V_{cr}$ 作为暂态稳定裕度的度量。实际应用中常使用稳定裕度的概念。近十多年来直接法应用中大多基于能量裕度的概念。

应用直接法分析系统稳定性的要点是需要构造一个能够反映系统稳定情况并符合规定的 Lyapunov 函数 $V(x)$, 同时还要确定一个和稳定域边界(临界条件)相应的函数值 V_{cr} , 将扰动后的 $V(x)$ 与 V_{cr} 进行比较, 若 $V(x) < V_{cr}$, 则系统是暂态稳定的; 反之, 系统是暂态不稳定的。

直接法的一个显著优点是它可以给出系统稳定程度的指标。这种稳定度指标对于分析系统的稳定状况及指导系统的运行都是非常有用的。直接法的另一个优点是它具有快速计算的潜力, 有可能发展成为在线暂稳分析的工具。

直接法的缺点是: 对电力系统模型的适应能力较差, 迄今仅在经典模型第一摆暂态稳定分析中得到了成功的实际应用。

早期阶段的直接法在多机系统中的应用遇到了“保守性”的困扰。这早期阶段的直接法在多机系统中的应用遇到了“保守性”的困扰。这

是因为简单地沿用了单机系统的概念，以最靠近稳定平衡点（Relevant Stable Equilibrium Point, SEP）的不稳平衡点（Unstable Equilibrium Point, UEP）上的势能作为临界能量 V_{cr} ，并以此 V_{cr} 来确定稳定域；另一方面是没有计及转移电导 G_{ij} 的影响。

Athay 等人于 1979 年首先提出了相关的不稳定平衡点（Relevant Unstable Equilibrium Point, RUEP）的概念^[8]，以此来计及故障位置对临界能量的影响。文献[9]还给出了计及转移电导的近似方法。以此为开端，形成了一类被称为暂态能量函数的暂稳分析方法，暂态能量函数在克服保守性方面取得了很大的进展，但由于在计算 RUEP 时，要依赖于故障后系统的轨迹或近似轨迹；计及转移电导时也要假设某个线性轨迹，因此这类方法已经不是完全“直接的”方法。作为直接法的一个重要分支的势能界面（Potential Energy Boundary Surface, PEBS）法^{[10][11]}，是利用指定故障点的持续故障轨迹代替临界故障轨迹，以持续故障轨迹与势能界面交点的能量作为定临界能量 V_{cr} 。在 PEBS 法的基础上，又形成了一种基于相关 UEP 的电力系统暂态稳定分析方法 BCU（Boundary of Stability Region Based Controlling Unstable Equilibrium Point Method）法^{[12][13][14]}。该方法是基于原始电力系统（经典电力系统模型）和一个被简化的系统（梯度系统模型）的稳定边界之间的关系来实现的，即通过梯度系统的相关 UEP 来找到原始系统的相关 UEP。

由 Chiang 和 Wu 等人提出的直接暂态稳定分析 BCU 法是迄今为止稳定域边界理论方面最为严格的方法。该法在对直接法进行理论分析及证明的基础上，对现有的 PEBS 和 RUEP 法的理论不足进行了解释，并由此提出了理论上更为严格的 BCU 方法。BCU 法实际上是在 PEBS 方法的理论基础之上，经过原始系统的收缩系统的事故后轨迹的计算，获得 Exit Point 点，并正确判断失稳模式，再用非线性代数方程组解法求解相应的 RUEP 的方法，因而从某种意义上说，它实际上是 PEBS 法和 RUEP 法的一种结合，故一些文献中又称之为 Hybrid 法。虽然 BCU 法具有较严格的理论基础，但在方法的实现中又作了一些计算假定，这主要反映在寻找 RUEP 时，要先使用持续故障轨迹，因而同样存在着 PEBS 法中的由于采用持续故障轨迹而引起的一些问题；此外，当轨迹接近 RUEP 时，该法需要迭代求解 RUEP，这又存在着 RUEP 法中初值给定及迭代收敛性问题。这些问题的存在，使得 BCU 法在具体实现中并非像其理论分析那样严格，同样也会

出现分析误差。

直接法研究的另一分支是我国学者薛禹胜教授于 1988 提出的扩展等面积定则 (EEAC) 法^{[15][16]}，该方法利用两机能量校正的概念，将多机系统的运动情况等值为两机群的惯性中心 (PCOI) 的相对运动，忽略各机群内部的非同调性，进而简化为单机无穷大的等值系统，根据单机系统的等面积定则分析系统的暂态稳定性^{[17][18][19]}。由于其计算方法简单，因此 EEAC 法在计算速度上具有优势，有在线应用的潜力。

1.2.3 混合法

综上所述，数值仿真法由于自身的优越性而在暂稳分析中占据了统治地位。由于计算机技术的发展，数值仿真法的计算速度方面的缺陷略有改善。但这类方法不能分析暂态稳定的内在机理，不能给出系统的稳定度的定量指标，这是数值仿真法的一个主要缺陷，这一缺陷迄今尚未得到有效的克服。

直接法能快速地给出系统稳定性的判定，能提供系统稳定程度的信息，能与灵敏度方法相结合分析参数运行和运行条件改变对系统暂态稳定性的影响。但由于直接法在计算方法和模型上的限制，使得直接法仍不能取代数值仿真法。

由于时域仿真法和直接法具有互补性，因此直接法和数值仿真法相结合是一个可行的发展方向。混合算法既保留了时域仿真法的精度，又利用了直接法快速的特点，可以较快地求出临界切除时间 (Critical Clearing Time, CCT)，还对数值仿真法暂态稳定程度的输出结果用直接法的理论进行分析，给出系统稳定程度的定量指标。

1984 年，IEEE 电力工程学会主席 Bose 教授在 IEEE Report 中论及直接法的未来发展时指出“数值仿真法与直接法相结合将打开电力系统暂稳分析的新视角，能有效地克服两种方法的缺点”。目前在这方面的研究主要有两个方向，一是用暂态能量的方法分析数值仿真法的输出结果，即输出分析技术；二是研究同时运用两种的混合法 (Hybrid Method)。

暂态稳定程序输出分析的概念是由 Fouad 等人^[20]于 1986 年首先提出的，这种方法应用暂态能量的方法分析数值仿真法的输出结果，实现暂态稳定程序输出结果的定量及自动分析。这一研究的特点是采用定义于惯

性中心坐标系下的单机能量函数。文献[19]和[20]通过对单机能量及变化特点的分析定义了发电机的稳定以及不稳定指标，借此分析发电机的稳定性，但指标的定义缺乏充分的根据，只在某些特定的故障条件下有效。我国学者穆钢于 1991 年提出了轨迹分析法^[21]，根据对单机能量沿轨迹变化的分析，提取出发电机稳定与否的特征量，并定义了具有固定临界值的稳定指标以及不稳定指标。轨迹分析法的提出有助于对暂态过程中单台发电机能量变化规律的深入认识。

虽然混合法在近几年的研究中取得了一定的进步，但仍沿用直接法分析的步骤，采用全局能量函数以及网络化简模型，不仅仍遇到直接法的求解临界能量的精度问题，而且稳定指标的计算方法也比较复杂。

1.3 电力系统暂态稳定域的介绍

1983 年 F.F.Wu 等人提出了动态安全域（Dynamic Security Regions，缩写为 DSR）的概念^[22]。“域”的方法是同传统的“逐点法”截然不同的一个新方法论。有了这样的安全域之后，判断系统状态的安全与否，只需判明注入向量是否位于安全域内即可。由于安全域可以离线计算，在线应用时简单、迅速，因此具有很大的应用潜力。在此基础上，应用非线性系统的稳定域边界理论及 Normal Form 变换方法可以确定电力系统暂态稳定边界，从而确定暂态稳定域^[23]。通过暂态稳定边界与持续故障轨迹的相交，可以求出故障的临界切除时间，用时间表示电力系统的暂态稳定裕度既方便又直观。

1.3.1 动态安全域的定义及特点

动态安全域是针对事故前系统注入空间上的“安全点”的集合，如果当前系统是运行在该集合中的某个点上，则可以保证对于相应的失稳模式，系统在事故后是稳定的。设网络结构 i 发生了持续时间为 t_c 的事故后网络结构变为 j ，事故清除瞬间的状态 x_{tc} 是注入 y 的函数记为 $\Phi(y)$ ；给定 y ，有且仅有唯一的稳定域与之对应，记为 $A(y)$ ，则 DSR 可定义为：

$$\Omega_d(i, j, t_c) = \{y \in R^n \mid \phi(y) \in A(y)\} \quad (1.2)$$

其边界定义为：

$$\partial\Omega_d(i, j, t_c) = \{y \in R^n \mid \phi(y) \in \partial A(y)\} \quad (1.3)$$

经过大量的仿真表明，DSR 的边界可以用有限个超子平面来近似描述：

$$\partial\Omega_d(i, j, t_c) = \bigcup_{\forall k} \partial\Omega^{(k)}(i, j, t_c) \quad (1.4)$$

DSR 法的实质是从事事故后暂态稳定分析到事故前动态安全分析的实用化意义的扩展，具有以下特点：

- 1) 具有“域”的思想。影响暂态稳定的因素是多种多样的，一般的暂态稳定分析方法都是针对某一特定的事故后系统状态空间上的运动轨迹。而 DSR 方法是系统正常运行时注入空间上“安全点”的集合，既包括系统当前的运行点，也包含系统未来一段时间内可能的运行点。从这一点上来看，DSR 法是一种更广义的方法。
- 2) 符合在线运行人员的需求。对于一个系统来说每年大部分时间都是处于正常运行状态，因此在线对系统的安全程度进行分析评估是很重要、很有意义的。对于运行人员，与其要求他把大部分注意力放在事故后根据软件分析的结果进行紧急控制，不如让他能在事故前根据动态安全分析结果及时调整系统运行参数，使系统尽可能保持在一个稳定程度较高的运行点运行，即把好预防这一关。
- 3) 可以考虑概率性因素。由于 DSR 是针对事故前系统的状况，因此它可以考虑一些例如事故发生的概率、继电保护装置动作时间甚至负荷曲线等含有较大随机性的情况。F.F.Wu 等人早在文献[22]中提出了动态安全评估中的概率考虑，文献[24]也就如何使用“到不安全的时间”的稳定性的概率指标做了探讨。在今后的电力市场环境下，负荷的突变、电能交易量的变化等也伴随着较大的随机性，而 DSR 方法将会在这一方面发挥优势。
- 4) 具有较好的鲁棒性、适应性和开放性。对于注入空间 y 上的一个微小摄动，相应事故后状态空间上的近似稳定域边界是一组互相平行的超平面。这就表明当注入在动态安全域的边界上的某个邻域变化时，对应的 UEP-1 处的雅可比矩阵的正实部特征值对应的特征向量对于 y 的摄动是稳定的。

电力市场新环境下的电网互联将引发新的安全稳定问题。运行部门需要强有力的在线分析工具，希望在实时掌握系统当前的运行状况的同时可以对可能发生的事故进行在线分析评估、预警与辅助决策，定量直观的了解安全稳定裕度，并能够通过可以控制的措施，如调节发电厂的出力、潮流水平或负荷大小，从而最大程度上的将系统维持在稳定裕度较高的正常运行状态。“域”的方法以其独特的观测视角在众多的在线安全评估中脱颖而出，具有广阔的发展前景。

文献[25]在近年来发展的电力系统暂态稳定结构保持模型、拓扑能量函数、势能界面法的基础上，使用超平面拟合正交选点的方法，构成了确定电力系统 DSR 的可行算法。利用这一算法进行了大量的计算，揭示了 DSR 的几个基本性质，并进而推荐出了一种实用的动态安全域（PDSR），将动态安全域的实用化工作向前推进了一大步。文献[26]证明了的几个重要拓扑学性质：DSR 是连通的；DSR 内无洞；DSR 边界不会“打结”和 DSR 边界是紧致的（即可用有限个局部表面的并来表示）。这些拓扑性质表明：DSR 是一个“内部无空洞的连通域”。在文献[27]中又进一步阐述了 DSR 的几个实用性质，从理论上阐明了可以用一组超平面来近似描述动态安全域的边界。

1.3.2 暂态稳定域的理论分析

非线性系统在某个吸引域内渐近稳定称为有限域渐近稳定。电力系统本是非线性大系统，在系统遭受大扰动后，系统的稳定平衡点 SEP 具有有限的稳定域，若故障切除后状态量位于稳定域内则系统渐近稳定，反之则不稳定。

由近年发展的稳定域边界理论可知，受扰动后的系统稳定域边界是由 x_i 的稳定流形的并集构成^{[28][29][30]}， x_i 为位于稳定边界上的不稳定平衡点。主导不稳定平衡点处系统的稳定流形就是将要与持续故障轨迹相交的主要的局部稳定边界。

Fouad AA 研究小组自 1996 年以来运用 Normal Form(规范型)研究电力系统的稳定性。他们研究了影响系统稳定域大小的因素^[31]，稳定域的大小是用曲率来描述的，因此他们是用 Normal Form 对电力系统的稳定域作了定性的分析。近两年来，Fouad AA 研究小组运用 Normal Form

来预报电力系统的失稳模式^{[32][33][34]}。国内的学者张保会、李颖晖在其基础上也对电力系统的稳定边界作了一些分析和研究^{[23][35][36][37][38]}。

电力系统的稳定边界是由位于稳定边界上的不稳定平衡点的稳定流形的并集构成,而每个这样的不稳定平衡点的稳定流形都是一个局部的稳定边界,当系统发生故障时,持续故障轨迹导向的局部稳定边界是我们所关心的,对其进行详尽的分析,可以获得电力系统的暂态稳定裕度。该稳定裕度可以由时间进行表示,这对于运行人员而言是及其直观的。

对局部稳定边界的分析,就是对不稳定平衡点处的稳定流形进行分析。由近年发展的非线性系统理论以及相应的 Normal Form 变换方法,可以对稳定流形进行一线性变换和一非线性变换,在变换后的空间中分析局部稳定边界的一些性质,并进而近似表达出这个局部稳定边界。

一旦我们获得了电力系统主导不稳定平衡点处的局部稳定边界,通过判断持续故障轨迹何时与其相交,就可以近似的获得故障的临界切除时间,进而可以求取用时间表示的稳定裕度。

1.4 本文的研究工作及意义

大型电力系统的互联以及开放的电力市场的发展使得现代电力系统日益受到暂态稳定性问题的威胁,暂态稳定分析以及控制是电力科学工作者所关心的重要课题。传统的暂态稳定分析方法由于面临一些不可避免的缺陷,如数值仿真法的计算速度较慢,不能对电力系统稳定性进行定量评价;直接法的模型适应能力差,并且其结果也不尽人意,时而保守,时而冒进,因此使得电力系统的暂态稳定分析在精度、速度以及复杂度方面很难有较大的突破。随着近年来非线性系统理论的发展,很多学者开始将一些非线性系统的新理论广泛用于电力系统中,获得了很多好的成果。

本文对采用稳定流形变换方法(即 Normal Form 规范型变换)分析电力系统的暂态稳定性进行了深入的研究,发现其存在一些问题。例如,在求取临界切除时间时,文献[36]中要对持续故障轨迹进行非线性变换,这样就存在着一对多的映射;而且,本人通过计算,该文中的方法在严重故障时和轻微故障时所得到的临界切除时间的精度并不一致,当发生严重故障(如三相短路)时,这种方法所得到的结果较接近于数值仿真法的结果,有较好的精度;而发生轻微故障(如单相短路)时,这种方法所得到的临

界切除时间则有很大的保守性，精度很低。这主要是由于两种情况下持续故障轨迹非线性程度不同所致，导致非线性变换的精度也不同。

因此，如何避免该方法的一些缺陷，使其更有效的应用于故障临界切除时间的求取上，从而对电力系统暂态稳定性有一个简单、精确、直观的分析，是本文要做的主要工作目的。

文第2章分析了电力系统受到大干扰情况下的暂态过渡物理过程，并介绍了暂态稳定性分析的基本流程以及切除时间和极限切除角度的关系。为分析系统的暂态稳定性，并为后续计算系统的临界切除时间提供必要的分析依据。

本文第3章介绍了非线性系统的稳定域边界理论以及稳定流形变换方法，即Normal Form变换方法。通过Normal Form变换，可以将原系统主导不稳定平衡点附近的稳定边界映射到Z空间，并从理论上分析了该空间中的局部稳定边界是一超平面，同时，从几何上也给出了其直观的表示。对该平面进行分析可知，这个超平面可用 $z_i=0$ 表示（其中i对应于唯一的正特征值），它的原象就是原系统主导不稳定平衡点附近的稳定边界。由于描述原系统的微分方程组经过Normal Form变换后将化为Z空间中的线性系统微分方程组，所以各变量（如相角、角速度）可解析表达，再利用Normal Form反变换则可以得到原系统空间中各变量的解析表达式，它是关于 z_1, z_2, \dots, z_n 的代数方程组，又由于稳定边界对应于 $z_i=0$ ，所以原系统空间中的稳定边界可求。在单机无穷大系统中，通过比较这个稳定边界和暂态能量函数法所求的稳定边界，可知该方法还是很有效的。与此同时，本文还分析了不采用Normal Form变换方法而直接在原系统中进行线性化所得到的稳定边界的有效性。

本文第4章首先叙述了故障临界切除时间的意义，然后介绍了采用Normal Form变换方法如何从稳定边界求取故障临界切除时间，最后分析了所求时间的有效性及时间裕度的计算和意义。在电力系统暂态稳定分析中，故障临界切除时间是一个极其重要且计算复杂的指标，当准确求得了故障临界切除时间，就可以判断系统在故障切除后是否能稳定运行。由于采用稳定流形变换（即Normal Form变换）方法可以确定主导不稳定平衡点处的稳定边界，所以本文通过判断持续故障轨迹何时和稳定边界相交来近似求取临界切除时间。这在两个空间（原系统空间和变换后的Z空间）中都可以进行计算，但其计算精度随故障类型不同而不同。在Z空间中，用这

种方法求取严重故障（如三相短路）时的临界切除时间与数值仿真法较接近，而在 X 空间(原系统空间)中用 Normal Form 变换法求取轻微故障（如单相短路）时的临界切除时间与数值仿真法较接近，因此将以上两种情况结合起来对各种故障类型求临界切除时间都可以获得很好的精度。时间裕度仿照能量裕度的定义，是用故障临界切除时间减去故障切除时间。时间裕度是一个较直观的概念，对于运行人员而言容易接受，这能使他们对电力系统的运行状态有一个较清晰的认识。

第2章 电力系统暂态稳定性分析

2.1 引言

电力系统在某一运行方式下，受到外界大扰动后，经过一个机电暂态过程能够回复到原始运行方式或达到一个新的稳态运行方式，则认为电力系统在这一运行方式下是暂态稳定的。暂态稳定与干扰的形式有关，一般有三种基本形式：

- (1) 突然变换电力系统的结构特性，最常见的是短路，包括单相接地、两相接地或三相短路。一般设短路发生在输电线上，但也可能发生在母线或其它电力系统元件上。在发生短路后，由断路器断开故障的元件，如果有重合闸装置，可以是重合成功（瞬时性故障），也可以是重合不成功（永久性故障）。无故障断开线路也属于这一类干扰。
- (2) 突然增加或减少发电机出力，如切除一台容量较大的发电机。
- (3) 突然增加或减少大量负荷。

2.2 电力系统的暂态过程及其稳定性分析的目的和意义

2.2.1 电力系统暂态过程的物理描述

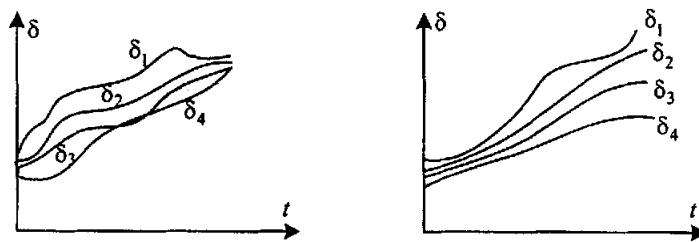
稳态运行情况下，电力系统中各发电机组输出的电磁转矩和原动机输入的机械转矩相平衡，各机组的转速保持恒定。在遭受大的干扰后，由于系统的结构或参数发生了较大的变化，使得系统的潮流及发电机的输出功率也随之发生变化，从而打破了原动机和发电机之间的功率平衡，在发电机转轴上产生不平衡转矩，导致转子加速或减速。一般情况下，干扰后各发电机的功率不平衡状况并不相同，加之各发电机组的转动惯量也不相同，使得各机组转速变化的情况各不相同。这样，各发电机转子之间将产生相对运动，使得转子之间的相对角度发生变化，而转子之间相对角度的变化又反过来影响各发电机的输出功率，从而使各个发电机的功率、转速

和转子之间的相对角度继续发生变化。

与此同时,由于发电机端电压和定子电流的变化,将引起励磁调解系统的调解过程;由于机组转速发生的变化,将引起调速系统的调解过程;由于网络中母线电压的变化,将引起负荷功率的变化,等等。这些变化都将直接或间接地影响发电机转轴上的功率平衡情况。

上述各种变化过程既相互联系又相互影响,形成了一个以各发电机转子机械运动和电磁功率变化为主体的机电暂态过程。

电力系统遭受大干扰后所发生的机电暂态过程可能有两种不同的结局。一种是个发电机转子之间的相对角度随时间的变化呈振荡（或称摇摆）状态。如果振荡的幅值逐渐衰减，各发电机之间的相对运动将逐渐消失，使得系统过渡到一个新的稳态运行情况（或者回复到干扰前的稳态运行情况），此时各发电机仍然保持同步运行。对于这种结局称电力系统是暂态稳定的。这里所说的过渡到新的稳态运行情况（或者干扰前的稳态运行情况）也称无扰运动。另一种结局是在暂态过程中，某些发电机转子之间始终存在着相对运动，使得转子之间的相对角度随时间不断增大，导致这些发电机之间失去同步。这时称电力系统是暂态不稳定的。暂态稳定和暂态不稳定两种情况下的发电机转子之间相对角度的变化情况分别如图 2.1(a) 和 2.1(b) 所示。发电机失去同步后，系统中的功率和电压将产生强烈的振荡，使得一些发电机和负荷被切除，严重情况下甚至导致系统的解列或瓦解。



(a) 稳定情况

(b) 不稳定情况

图 2.1 暂态过程中各发电机的功角曲线

(a) transient stability

(b) transient instability

Fig. 2.1 The power-degree curve of various generator in transient status

2.2.2 电力系统暂态稳定性分析的目的和意义

电力系统发生大干扰是人们所不希望的，但事实上又是无法避免的。由于系统在遭受大的干扰后失去稳定的后果往往很严重，有时甚至是灾难性的，因此通常希望规划、设计出一个强壮的系统，使它能够承受一定强度的干扰冲击。显然，要求系统能够承受所有可能发生的干扰既不必要，也不经济。事实上，电力系统遭受的各种大干扰。特别是短路故障是以一定的概率随即发生，因此系统的设计以及运行方式的制定都只需要保证系统在根据某些原则决定的预想事故下能够稳定。与经济和社会状况有关，各国对系统稳定性的要求有所不同，因此对事故预想的选择原则也有不同的标准。我国对系统稳定性的要求反映在《电力系统安全稳定导则》中。

电力系统在事故预想下能否稳定运行，一般需要经过暂态稳定性计算后方可知道。当系统不稳定时，则需要研究提高系统稳定性的有效措施；而在系统发生重大稳定破坏事故后，需要进行事故分析，找出系统的薄弱环节，并提出相应的对策。

2.3 电力系统暂态稳定性分析

2.3.1 暂态稳定性分析的基本流程

目前，电力系统暂态稳定性分析的主要方法是对遭受大干扰后系统的微分方程式进行求解，从而判断系统是否稳定，即本文 1.2.1 节介绍的数值仿真方法。由于描述电力系统暂态稳定性的微分和代数方程组中含有非线性的方程，一般不易求出其解析解，因此只能应用数值积分方法。

事实上，在系统遭受干扰后的整个暂态过程中，描述系统动态过程的微分一代数方程式(1.1a)和(1.1b)在各个阶段有所不同。在某些情况下，整个过程可能经历多个阶段，例如，先是某一线路发生短路故障，经一定时间后故障线路被切除，以后又进行自动重合闸，并在重合不成功的情况下再次切除故障线路，有时还需要切除发电机或负荷等等。这样，全部过程将包括多次故障和操作，而每经一次故障或操作，由于网络结构和参数的变化，需要相应地改变微分方程和代数方程。除了故障或操作以外，一些调解系统限幅环节的存在也导致在暂态过程中微分方程和代数方程的改变。

对于在不同时刻发生的各种故障或操作需要依次求解相应的微分一代数方程式。由于状态变量 $X(t)$ 在整个暂态过程中不能突变（否则对时间的导数为无穷大），需要每次故障或操作前状态变量的取值作为求解故障或操作后微分方程的初值。显然，对于代数变量 $Y(t)$ 来说，在故障或操作瞬间将可能发生突变。具体来说，在进行暂态稳定分析中将根据故障或操作发生时刻把整个暂态过程划分为若干个时段，在同一时段内，函数 Φ 和 F 的结构和内容不变，而在各个时段之间， Φ 或 F 或者相同或者各不相同。而一个时段结束时刻状态变量的取值将作为下一时段开始时刻状态变量的初值。

例如，对于在 $t=0s$ 系统发生故障， $t=t_c$ 时刻切除故障的简单情况，暂态稳定性计算的示意图如图 2.2 所示。

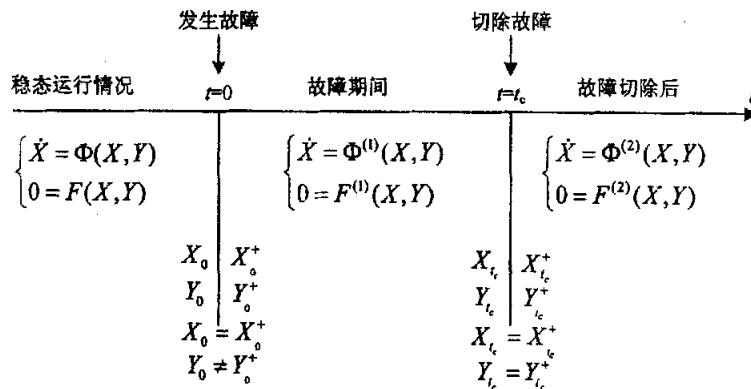


图 2.2 简单情况下暂态稳定性计算的示意图

Fig. 2.2 The sketch map of stability calculation in the simple instance

整个电力系统暂态稳定性计算的基本流程入图 2.3 所示，其中各部分的内容描述如下：

在进行电力系统暂态稳定性计算之前，首先应用潮流计算程序求出干扰前给定的系统运行状态，也就是由潮流计算得出各节点的电压和注入功率，然后求出系统的运行参数 Y_0 ，并由它计算出状态变量的初始值 X_0 ，见图中框(1)和框(2)。

框(3)是根据各元件所采用的数学模型形成相应的微分方程，并根据所用的求解方法形成相应的网络方程。应当注意的是，在暂态稳定计算中的网络模型和潮流计算所采用的有所区别，前者还要考虑到发电机和负荷的影响。

从框(4)开始,进入暂态过程计算。在目前的大多数暂态稳定计算程序中,积分步长 Δt 取为固定不变的常数。假定暂态过程的计算已进行到时刻 t ,这时的 X_t 和 Y_t 为已知量。在计算 $t + \Delta t$ 时刻的 $X_{(t+\Delta t)}$ 和 $Y_{(t+\Delta t)}$ 时,

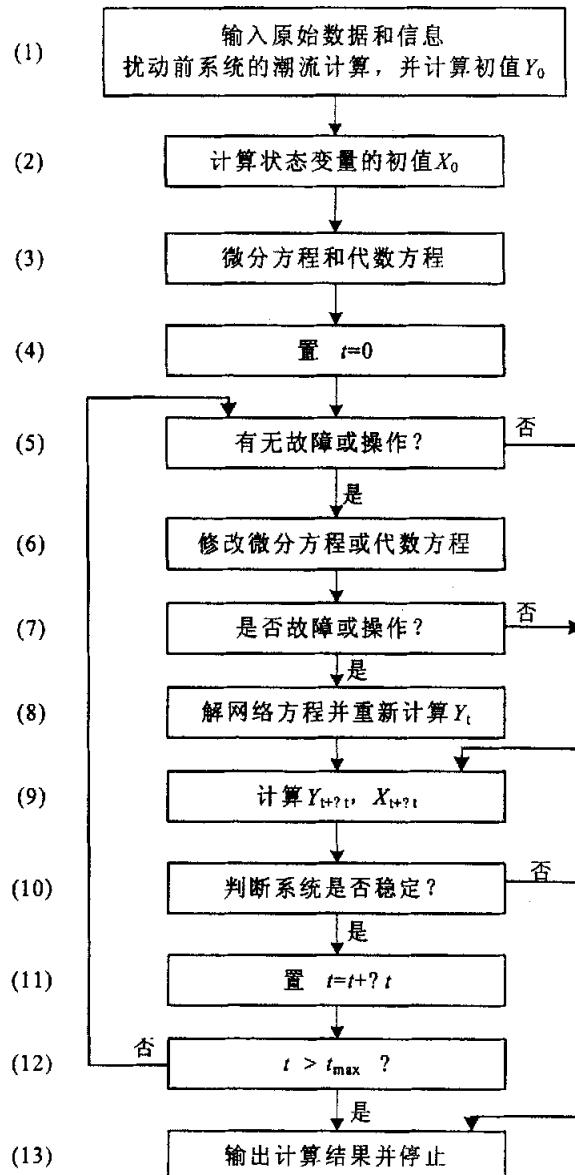


图 2.3 暂态稳定性分析的基本流程

Fig. 2.3 The basic flow chart of transient stability analysis

应首先检查在 t 时刻系统有无故障或操作;如果有故障或操作,则需对微

分方程或/和代数方程式进行修改, 见图中的(5)、(6)两框。而且当故障或操作发生在网络内时, 系统的运行参数 Y_t 可能发生突变, 因此必须重新求解网络方程, 以便得出故障或操作后的运行参数 Y_t^+ , 见图中(7)、(8)两框。

由于状态变量不会发生突变, 因此故障或操作前后的 X_t 和 X_t^+ 相同。

在网络发生故障或操作时, 一般通过改变网络的导纳矩阵来改变网络方程式。对于元件的三相开断或三相投入, 可以处理成对应的接地支路或不接地支路的参数发生相应的变化, 从而很容易地改变导纳矩阵中的元素; 对于三相短路, 如果计及短路点电弧阻抗的影响, 可以在短路点处接入相应的阻抗, 否则可接入一个足够大的接地导纳, 使短路点的对地阻抗接近于零。对于不对称短路或断线, 则通常忽略负序和零序分量电压、电流对发电机电磁转矩的影响, 而只考虑它们对网络中正序电压、电流的影响。这是因为发电机的负序电压和负序电流所产生的电磁转矩是随时间交变的, 在一个基波周期内的平均值很小(主要是在电阻中的损耗)而可以忽略不计。至于零序电流, 则除了在定子回路中引起不大的损耗以外, 其他别无影响。因此, 对于不对称短路, 可以应用正序等效定则, 在短路点接入一个由短路类型决定的附加接地阻抗 Z_Δ , 以反映负序和零序网络对正序分量的影响。对于按相开断或不对称断线, 则同理在断口处串联接入一个由断线类型决定的附加阻抗, 以反映负序和零序网络对正序分量的影响。短路点的附加阻抗和断线时断口的附加阻抗与短路类型和断线类型之间的关系如表 2.1 所示。表中 $Z_{\Sigma 1}$ 、 $Z_{\Sigma 2}$ 和 $Z_{\Sigma 0}$ 分别为从短路点(短路端口)向各序网络看进去的等值阻抗, Z_t 为短路点接地阻抗; $Z^{(2)}$ 为负序网中断口处的等值阻抗, $Z^{(0)}$ 为零序网中断口处的等值阻抗。

框(9)是对微分一代数方程组在 t 到 $t+\Delta t$ 时间段内进行一步数值积分的计算, 它由 X_t 和 Y_t 求出 $X_{(t+\Delta t)}$ 和 $Y_{(t+\Delta t)}$ 的取值; 然后在框(10)中利用适当的判据进行系统稳定性的判断(目前大都采用任意两台发电机转子间的相对摇摆角度超过 $180^\circ \sim 200^\circ$ 作为系统失去暂态稳定的判据)。如果已经能够判断系统将失去稳定, 则打计算结果, 并停止计算(见框(13)); 否则, 经

框(11)将时间向前推进 Δt ，进行下一步的计算，直至到达预定的时刻 t_{\max} (见框(12))。

表 2.1 短路和断线时的附加阻抗

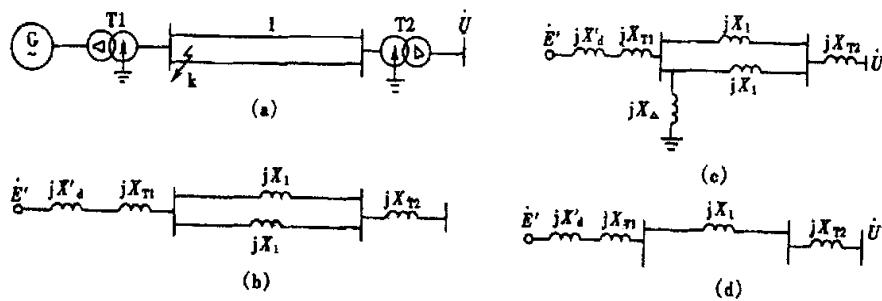
Table 2.1 The additional impedance

短路类型	附加阻抗 Z_s	断线类型	附加阻抗 Z_s
三相短路	0	单相断线	$\frac{Z^{(1)}Z^{(0)}}{(Z^{(2)} + Z^{(0)})}$
单项短路	$Z_{z2} + (Z_{z0} + 3Z_f)$		
两相短路	$Z_{z2} + Z_f$	两相断线	$Z^{(2)} + Z^{(0)}$
两相接地短路	$\frac{Z_{z2}(Z_{z0} + 3Z_f)}{Z_{z2} + (Z_{z0} + 3Z_f)}$		

t_{\max} 大小与所研究问题的性质有关。当仅关心第一摇摆周期的系统稳定性时，通常取 $t_{\max} = 1: 1.5s$ 。对于这种情况，暂态稳定性计算容许采用较多的简化。例如，由于原动机及调速系统的时间常数较大，因而可以忽略调速器的作用而假定原动机的机械功率保持不变；将励磁调节系统的作用近似地考虑为在暂态过程中保持发电机暂态电动势不变。对于大规模互联电力系统，失去暂态稳定的过程发展较慢，往往需要计算到几秒甚至十几秒才可能判断出系统是否稳定。在这种情况下，必须采用更复杂的数学模型来模拟系统的暂态过程，例如计及发电机组励磁调节系统和原动机调速系统的作用，考虑直流输电系统，考虑其他控制装置的作用等。

2.3.2 简单电力系统暂态稳定性分析

如图 2.4 所示的简单电力系统，在输电线路始端发生短路故障，以此对系统的暂态稳定性做以分析。



(a)系统图 (b)正常运行时的等值电路 (c)短路故障时的等值电路 (d)故障切除后的等值电路

图 2.4 简单电力系统及其等值网络

Fig. 2.4 The equivalence network of simple power system

1) 简单电力系统在各种运行情况下的功角特性

正常运行情况 (I)

如图 2.4 简单电力系统受到大干扰(短路)之前, 其等值电路如图 2.4(b) 所示。送端电源到受端系统的综合电抗为

$$X_1 = X_d' + X_{T_1} + \frac{1}{2}X_1 + X_{T_2} \quad (2.1)$$

根据给定的运行条件和正常的潮流计算, 可以计算暂态电抗 X_d' 后的电势 E' , 并假定 E' 为常数, 于是正常运行时的功角特性方程式为

$$P_f = \frac{E'U}{X_1} \sin \delta = P_m \sin \delta \quad (2.2)$$

其功角特性曲线, 如图 2.5 中的 P_f 所示。

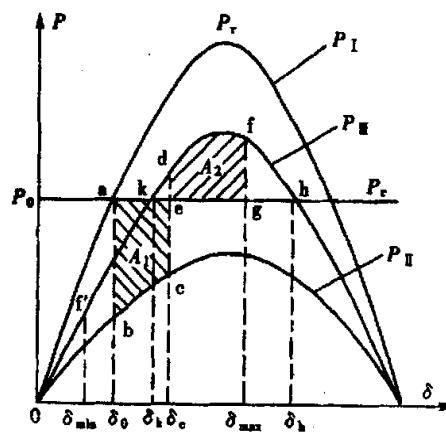


图 2.5 功角特性曲线及等面积定则

Fig. 2.5 The power-degree curve and equal area criterion

短路故障时 (II)

电力系统发生短路故障时的等值电路如图 2.4(c)所示。其附加阻抗 X_A 与故障的形式有关。这时送端电源到受端系统的综合电抗 X_{II} 由为 $Y \Rightarrow \Delta$ 变换得

$$X_{II} = (X_d + X_{T_1}) + \left(\frac{1}{2}X_1 + X_{T_2}\right) + \frac{(X_d + X_{T_1})(\frac{1}{2}X_1 + X_{T_2})}{X_A} \quad (2.3)$$

于是故障时的功角特性方程式为

$$P_{II} = \frac{E'U}{X_{II}} \sin \delta = P_{II_{\text{m}}} \sin \delta \quad (2.4)$$

其功角特性曲线, 如图 2.5 中的 P_{II} 所示。

短路切除后 (III)

故障切除后的等值电路, 如图 2.4(d)所示, 此时送端电源到受端系统的转移电抗 X_{III} 为

$$X_{III} = X_d + X_{T_1} + X_1 + X_{T_2} \quad (2.5)$$

于是故障后的功角特性方程式为

$$P_{III} = \frac{E'U}{X_{III}} \sin \delta = P_{III_{\text{m}}} \sin \delta \quad (2.6)$$

其功角特性曲线, 如图 2.5 中的 P_{III} 所示。

2) 简单电力系统受大干扰后发电机转子的摇摆情况

在正常运行情况下, 若原动机输入的机械功率为 P_T , 发电机输出的电磁功率应与原动机输入的机械功率相平衡, 发电机工作点由 P_T 和 P_I 的交点确定, 即为 a 点, 与此对应的功角为 δ_0 , 见图 2.5。

发生短路瞬间, 由于不考虑定子回路的非周期分量, 则周期分量的功率是可以突变的, 于是发电机运行由功角特性曲线 P_I 突然降为功角特性曲

线 P_{II} ，又由于发电机组转子机械运动的惯性所致，功角 δ 不可能突变，仍为 δ_0 ，那么运行点将由功角特性曲线 P_I 上的 a 点跃降到短路时功角特性曲线 P_{II} 上的 b 点。达 b 点后，由于输入的机械功率为 P_T 大于输出的电磁功率，过剩功率 $\Delta P = P_T - P_{em}$ 大于零，由转子运动方程可知，转子开始加速，即 $\Delta\omega > 0$ ，功角 δ 开始增大。此时运行点将沿着功角特性曲线 P_{II} 运动。经过一段时间，设功角增大到 δ_c ，运行点达到 c 点时（运行点从 b 点运行到 c 点的过程是转子由同步转速开始逐渐加速的过程），故障线路两端的继电保护装置动作，切除了故障线路。在此瞬间，运行点将由 P_{II} 上的 c 点跃降到 P_{III} 上的 d 点，此时转子的速度 $\omega_d = \omega_c = \omega_{max}$ 。达到 d 点后，过剩功率 $\Delta P = P_T - P_{em}$ 小于零，根据转子运动方程，转子将开始减速。由于此时， $\omega_d > \omega_0$ 及机组转子惯性的作用，则功角 δ 还将增大，运行点沿 P_{III} 曲线由 d 点向 f 点运动，当转速降到同步速时，运行点达到 f 点（即 $\omega_f = \omega_0$ ）。由于此时过剩功率 $\Delta P = P_T - P_{em}$ 仍然小于零，根据转子运动方程，转子仍将继续减速，功角则不再继续增大，而开始减小（运行点从 d 点运动到 f 点的过程是转子减速的过程，到达 f 点时，转子减到同步转速 ω_0 ，此时的功角 $\delta_f = \delta_{max}$ 达到最大）。这样一来，运行点仍将沿着功角特性曲线 P_{III} 从 f 点向 d、k 点运动。在 k 点时有 $P_T = P_{em}$ ，过剩功率等于零，减速停止，则转子速度达到最小 $\omega_k = \omega_{min}$ （运行点从 f 点到 k 点的过程是转子减速的过程）。但由于机械惯性的作用，功角 δ 将继续减小，当过 k 点后，过剩功率又将大于零，转子又开始加速。加速到同步转速 ω_0 时，运行点到达 f' 点（ $\omega_{f'} = \omega_0$ ），此时的功角 $\delta_{f'} = \delta_{min}$ 达到最小。随后功角 δ 又将开始增大，即开始第二次振荡。如果振荡过程中不计阻尼的作用，则将是一个等幅振荡，

不能稳定下来，但实际振荡过程中总有一定的阻尼作用，因此这样的振荡将逐步衰减，系统最后停留在一个新的运行点 k 上继续同步运行。上述过程表明系统在受到大干扰后，可以保持暂态稳定。

如果短路故障的时间较长，即故障切除迟一些， δ_c 将摆得更大。这样故障切除后，运行点沿曲线 P_{III} 向功角增大的方向移动的过程中，虽然转子也在逐渐地减速，但运行点到达曲线 P_{III} 上的 h 点时，如果发电机的转子还没有减速到同步速，过了 h 点后，情况将发生变化，由于过剩功率又将大于零，发电机转子又开始加速（还没有减速到同步转速又开始加速），而且加速愈来愈快，功角 δ 将无限增大，发电机与系统之间将失去同步（原动机输入的机械功率于发电机输出的电磁功率不可能平衡）。这样的过程表明系统在受到大干扰后暂态不稳定。

3) 等面积定则

当不考虑振荡中的能量损耗时，可以根据等面积定则确定最大摇摆角 δ_{max} （或最小角度 δ_{min} ），并判断系统的暂态稳定性。从前面的分析可知，功角由 δ_0 变化到 δ_c 的过程中， P_T 大于电磁功率（即过剩功率大于零），使转子加速，过剩的能量转变成转子的动能而储存在转子中。但功角由 δ_c 向 δ_{max} 增大过程中，发电机的电磁功率大于 P_T （即过剩功率小于零），使转子减速，并释放转子储存的动能。

转子由 δ_0 到 δ_c 变动时，过剩转矩所做的功为

$$W_a = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \Delta M d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \frac{\Delta P}{\omega} d\delta \quad (2.7)$$

用标么值计算时，因发电机转速偏离同步转速不大， $\omega \approx 1$ ，于是

$$W_a = \int_{\delta_0}^{\delta_c} \Delta P d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_T - P_{II}) d\delta = A_1 \text{ (面积 abce)} \quad (2.8)$$

式中 A_1 —— 加速面积，即转子加速期间动能的增量。

当转子由 δ_0 变到 δ_{max} 时，转子过剩转矩对应的功率为

$$W_b = \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} \Delta M d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} \Delta P d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_{max}} (P_T - P_{III}) d\delta = A_2 \text{ (面积 edfg)} \quad (2.9)$$

式中 $(P_T - P_{\text{III}}) < 0$ ，所以 A_2 称为减速面积，即动能的增量为负值，说明转子动能减少，转速下降。

当功角到达 δ_{max} 时，转子转速重新达到同步转速 ($\omega = \omega_0$)，说明转子在加速期间积蓄的动能增量全部耗尽，即加速面积与减速面积的大小相等，这就是等面积定则。即

$$W_a + W_b = \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{max}}} (P_T - P_{\text{II}}) d\delta + \int_{\delta_0}^{\delta_{\text{max}}} (P_T - P_{\text{III}}) d\delta = 0 \text{ (面积 edfge)} \quad (2.10)$$

也可以写成

$$|A_1| = |A_2| \quad (2.11)$$

2.3.3 临界切除时间和极限切除角度的确定

显然，如果故障切除时间较晚，即 δ_c 较大，以致最大可能的减速面积 (deh 所包围的面积) 仍小于加速面积 (abce 所包围的面积)，则达到运行点 h 时的发电机转子角速度仍大于同步角速度，那么便又重新加速而失去同步。

利用上述等面积定则可以决定极限切除时间和相应的极限切除角度，即保证系统不失去同步的最大切除角 δ_{cm} 。根据 2.3.2 节的分析，为了保证系统不失去稳定，必须在到达 h 点以前使转子恢复到同步角速度 ω_0 。因此极限情况是在 h 点转子正好恢复至同步角速度。

减速面积的大小与与故障切除角 δ_c 的大小有直接关系， δ_c 越小，减速面积就越大。当在极限切除角 δ_{cm} 切除故障时，可使最大可能的减速面积刚好等于加速面积，则 δ_{cm} 就称为极限切除角。应用等面积定则有

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\text{cm}}} (P_T - P_{\text{II}}) d\delta + \int_{\delta_{\text{cm}}}^{\delta_c} (P_T - P_{\text{III}}) d\delta = 0 \quad (2.12)$$

$$\delta_c = \pi - \sin^{-1} \frac{P_T}{P_{\text{III}} \omega_0} \quad (2.13)$$

将式 (2.12) 的积分展开整理后可得

$$\delta_{cm} = \cos^{-1} \frac{P_T(\delta_b - \delta_0) + P_{lim} \cos \delta_b - P_{lim} \cos \delta_0}{P_{lim} - P_{lim}} \quad (2.13)$$

发电机转子运动方程是非线性微分方程。由于所研究的暂态稳定性是指电力系统在受到大干扰的情况下是否保持稳定的问题，因此不能按静态稳定分析方法那样将受到小干扰的转子运动方程在运行点附近线性化。也就是说不能求得它的解析解，而只能采用数值计算方法求得它的近似解，即摇摆曲线 $\delta = f(t)$ 。摇摆曲线描述了电力系统受到大干扰后，发电机转子功角摇摆随时间的变化规律。根据它的变化情况就可以判断系统的暂态稳定性，也可以按时间 t 与功角 δ 的对应关系，确定临界切除时间 t_{cm} 。

2.4 电力系统暂态稳定性与稳定域的关系

对于简单电力系统，考虑图 2.5 中的两个平衡点，一个是故障前的运行点，另一个是暂态稳定情况下的故障切除后的运行点 $\delta = \delta_k$, $\omega = \omega_0$ 。它们在由 δ 和 ω 组成的状态空间中的位置如图 2.6 中的 a 点和 k 点所示。由于在故障切除后的运行点 k 处于图 2.6 中故障切除后功率曲线的上升段，因此，运行点 k 是小干扰稳定的，即状态空间图 2.6 中的 k 点是稳定平衡点。于是，在它的周围必将存在一个渐近稳定域，如图 2.6 中的域 Ω 。

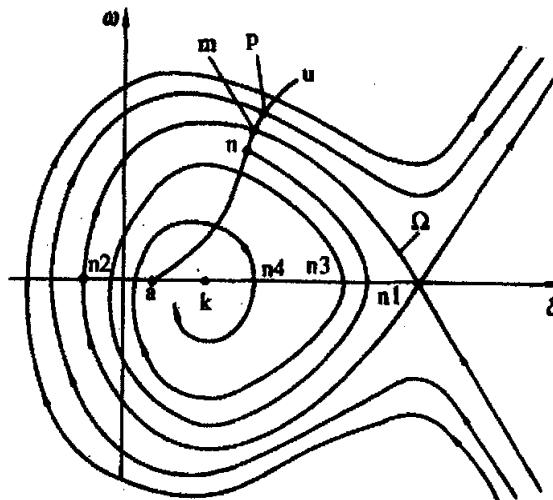


图 2.6 暂态稳定性与稳定域的关系图

Fig. 2.6 The relationship chart of transient stability and stable region

当系统在运行点 a 遭受短路干扰后, δ 和 ω 将逐渐增大。如果故障不被切除而持续存在, 则系统将沿着图 2.6 中的 a-n-m-p-u 轨线运动。如果故障线路被及时切除, 则在故障期间系统将沿同样的轨线运动, 而在故障切除瞬间到达状态空间中的 n 点 (δ_c, ω_c), 在此情况下, 故障切除以后, 系统将沿着 n-n₁-n₂-n₃-n₄…轨线作衰减振荡, 并最终到达状态空间中的 k 点。按照渐近稳定域的定义, 显然点 n 应该在平衡点 k 的吸引域之内, 而 n 点与 k 点状态变量之差 ($\delta_c - \delta_k, \omega_c - \omega_k$) 便相当于对平衡 k 点的初始扰动。如果故障切除时间过长, 则故障切除瞬间系统的状态在图 2.6 中的 p 点, 它相当于初始扰动在稳定域 Ω 之外, 在此情况下系统最终将不能到达平衡点 k, 即系统是暂态不稳定的。

显然, 在图 2.6 中, m 点对应于短路在临界切除时间 t_{cm} 被清除的情况。

由以上分析可以看出, 电力系统的暂态稳定性与一般动力学系统无扰运动的渐近稳定域在理论上有着严格的对应关系。在 2.3.2 节的分析中, 故障切除后的平衡点 k 对应于给定的无扰运动, 这一平衡点是小干扰稳定的, 故常称为稳定平衡点 (与 k 点相对应的, 图 2.5 中的 h 点称为不稳定平衡点)。故障切除瞬间系统的状态 (δ_c, ω_c) 相对于无扰运动 (δ_k, ω_k) 来说相当于初始扰动。如果初始扰动在无扰运动的渐近稳定域之内, 则系统最终将到达无扰运动, 即故障切除后的稳定平衡点, 与它相对应的, 电力系统是暂态稳定的; 反之, 如果初始扰动在无扰运动的渐近稳定域之外, 则系统不可能到达无扰运动, 相应地, 电力系统是暂态不稳定的。以上便是电力系统暂态稳定性与渐近稳定域的关系。这里要注意以下两点:

(1) 如果系统相继遭受多次干扰, 例如, 线路发生短路故障, 继而切除故障线路, 过一定时间后对线路进行重合闸, 并在永久性故障的情况下再次切除线路。在这样的情况下, 系统最后一次故障或操作 (在现在的情况下便是再次切除故障) 瞬间的状态才是相对于无扰运动的初始状态, 只要它在无扰运动的渐近稳定域内, 系统是暂态稳定的, 而不管前面的状态如何。

(2) 在一些情况下, 无扰运动平衡点可能与干扰前系统的平衡点一

致，即图 2.5 中的 k 点与 a 点相同。例如，在上面所提到的对线路进行重合闸，如果重合成功，便属于这种情况。然而，在大部分情况下，特别是对复杂系统来说，无扰运动平衡点与干扰前系统的平衡点并不相同。

上述电力系统暂态稳定性与渐近稳定域之间的关系，完全可以推广到复杂电力系统的情况，只不过在复杂系统中状态空间的维数高，渐近稳定域的结构非常复杂，而且稳定平衡点和不稳定平衡点的个数甚多。

2.5 小结

电力系统暂态分析是一个复杂而又十分重要的任务。为了分析系统的暂态稳定性，并为后续计算系统的临界切除时间提供必要的分析依据，本章分析了电力系统受到大干扰情况下的暂态过渡物理过程，并介绍了暂态稳定性分析的基本流程以及切除时间和极限切除角度的关系。至于进一步的判断电力系统的暂态稳定性方法和如何确定临界切除时间将在下面章节论述。

第3章 稳定域边界理论及Normal Form变换

3.1 引言

近年来，随着非线性系统理论的发展，很多成果开始应用于电力系统中，在电力系统暂态稳定分析中，Normal Form变换方法在确定暂态稳定域方面开创了一个新的思路。由稳定域边界理论可知，受扰动后的系统稳定域边界是由 x_i 的稳定流形的并集构成， x_i 为位于稳定边界上的不稳定平衡点。主导不稳定平衡点处系统的稳定流形就是将要与持续故障轨迹相交的主要的局部稳定边界。

根据非线性动力学系统理论，将经大扰动后电力系统的一组微分方程利用 Normal Form 变换方法可以化为 Normal Form 型(规范型)，并可以从理论上给出平衡点附近的局部稳定边界，由所有不稳定平衡点附近的局部稳定边界可以构成故障后电力系统的完整的稳定边界，为研究电力系统的暂态稳定性奠定理论基础。

分析变换到 Z 空间中的稳定边界的性质可以在原系统空间中近似获得局部稳定边界的解析表达式，对该稳定边界研究可知它在主导不稳定平衡点附近是非常有效的。

3.2 非线性系统稳定域边界理论

3.2.1 稳定边界与稳定流形的关系

对于非线性自治系统

$$\tilde{x} = f(x), \quad x(0) = 0, \quad x \in R^n, f: R^n \rightarrow R^n \quad (3.1)$$

若 \tilde{x} 满足 $f(\tilde{x})=0$ ，则称 \tilde{x} 是该系统的一个平衡点。设 $J(\tilde{x})$ 是 $f(\tilde{x})$ 在 \tilde{x} 的雅可比矩阵，若 $J(\tilde{x})$ 有一个正实部特征根，则 \tilde{x} 称为 I 型不稳定平衡点，若 $J(\tilde{x})$ 有 n 个正实部特征根，则 \tilde{x} 称为 n 型不稳定平衡点，若 $J(\tilde{x})$

无正实部特征根，则 \tilde{x} 称为稳定平衡点，若 $J(\tilde{x})$ 没有零实部特征根，则 \tilde{x} 称为双曲平衡点。

设 $x(t)$ 为式(3.1)的解曲线，对于系统的一个双曲平衡点 \tilde{x} ，它的稳定流形和不稳定流形为

$$W^s(\tilde{x}) = \{x \mid x(t) \rightarrow \tilde{x}, t \rightarrow +\infty\}$$

$$W^u(\tilde{x}) = \{x \mid x(t) \rightarrow \tilde{x}, t \rightarrow -\infty\}$$

若 \tilde{x} 为非双曲平衡点，则系统在附近的行为将复杂化，可能出现混沌及分歧。

定理 3.1：对于系统(3.1)， \tilde{x} 是稳定平衡点 x_s 的稳定边界 $\partial A(x_s)$ 上的一个不稳定平衡点，当(且仅当) $W^u(\tilde{x}) \cap A(x_s) \neq \emptyset$ ，其中 $A(x_s)$ 为系统的稳定域。

定理 3.2：设 x_i 是稳定平衡点， x_s 是稳定边界上的不稳定平衡点，则 $\partial A(x_s) = \bigcup_{x_i \in E \cap \partial A} W^s(x_i)$ ，其中 E 为所有不稳定平衡点的集合。

定理 3.1 表明若不稳定平衡点 x_i 的不稳定流形中有一条趋于稳定平衡点 x_s ，则 x_i 必在 x_s 的稳定边界上；定理 3.2 表明 x_s 的稳定边界是由 x_i 的稳定流形的并集构成， x_i 为位于 x_s 的稳定边界上的不稳定平衡点。

定义 3.1：由故障轨迹 $x_f(t)$ 导向的主导不稳定平衡点(CUEP)的稳定流形包含故障时轨迹 $x_f(t)$ 在稳定边界的出口点。

对于 n 维的欧几里德空间，其中的曲面是 $n-1$ 维的，所以稳定边界曲面是 $n-1$ 维的，又只有 I 型不稳定平衡点的稳定流形是 $n-1$ 维的，因此可以推论出稳定边界上的不稳定平衡点均为 I 型的。

由定理 3.2，可在每一个满足定理 3.1 的 I 型不稳定平衡点上求得系统的稳定流形，这些稳定流形构成电力系统故障后的稳定边界。然而，系统故障后的稳定性是由持续故障轨迹导向的那一部分稳定边界确定，因此只需求得主导不稳定平衡点的稳定流形就可得故障轨迹将穿越的局部稳定边界。

3.2.3 不变子空间与不变流形的关系

由于确定稳定域边界必须求得非线性系统的不变稳定流形，所以在此先论述线性系统的不变子空间与非线性系统的不变流形的关系，为求得系统的稳定流形奠定基础。

常微分方程

$$\dot{X} = AX, X \in R^n, X_0 = X(0) \quad (3.2)$$

表示一个线性系统，其解为

$$\phi(X_0, t) = \phi_t(X_0) = X_0 e^{At} \quad (3.3)$$

称 e^{At} 为由向量场定义的在 R^n 上的流。算子 $e^{At} : R^n \rightarrow R^n$ 适应于任何点 $X_0 \in R^n$ ，因而包含了系统的全局信息。 e^{At} 可视为解的集合，由 A 的特征向量张成的线性子空间中的解在映射下是不变的，即如果 A 的一个特征向量是 v_j ，它也是 e^{At} 的一个特征向量，则点 $c_j v_j \in R^n$ 的解始终留在 v_j 张成的子空间内，因此线性系统向量场的特征空间是对流而言的不变子空间。

设线性系统具有 n_s 个负实部的特征根 v^1, \dots, v^{n_s} ， n_u 个正实部的特征根 u^1, \dots, u^{n_u} ， n_c 个零实部的特征根 w^1, \dots, w^{n_c} ， $n_s + n_u + n_c = n$ ，则

$E^s = \{v^1, \dots, v^{n_s}\}$ 张成线性系统的稳定子空间；

$E^u = \{u^1, \dots, u^{n_u}\}$ 张成线性系统的不稳定子空间；

$E^c = \{w^1, \dots, w^{n_c}\}$ 张成线性系统的中心子空间。

对于一个非线性系统

$$\dot{X} = f(X), X \in R^n, f : R^n \rightarrow R^n, X_0 = X(0) \quad (3.4)$$

考察其一个平衡点 \tilde{X} ，应满足 $f(\tilde{X}) = 0$ ，式 (3.4) 在 \tilde{X} 处的线性化系统为

$$\dot{\zeta} = Df(\tilde{X})\zeta, \zeta \in R^n \quad (3.5)$$

式中 $Df(\tilde{X})$ 是 $f(X)$ 在 \tilde{X} 点对 x 的 Frechet 导数，即在 \tilde{X} 处的 Jacobi 矩阵

$$Df(\tilde{X}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{x=\tilde{x}} \quad (3.6)$$

式 (3-4) 与其线性化系统具有以下两个定理所述的关系:

定理 3.3(Hartman—Grobman): 如果线性化系统只具有非零实部的特征根, 则 x 的邻域 U 上存在一个同胚 $h: U \rightarrow h(U)$, 将非线性流映射为线性流。

定理 3.4: 如果非线性系统 $\dot{x} = f(x)$ 有一个双曲奇点 x_1 , 则

- (1) 局部稳定流形 $W_L^s(x_1)$ 与局部不稳定流形 $W_L^u(x_1)$ 存在;
- (2) $W_L^s(x_1)$ 和 $W_L^u(x_1)$ 与对应线性化系统的特征空间 E^s 和 E^u 的维数相同;
- (3) $W_L^s(x_1)$ 和 $W_L^u(x_1)$ 与 E^s 和 E^u 相切于 x_1 。

这里 x_1 为双曲奇点(平衡点), 否则同胚不一定存在, 在 x_1 附近的渐进性质不再由线性化系统决定。

3.3 Normal Form 变换及稳定域边界的确定

3.3.1 Normal Form 变换方法

Normal Form 变换方法是近几年发展起来的研究非线形系统在某个平衡点附近的动态特性的数学工具, 对于一个非线性系统, 如式 (3.4), 设其平衡点为坐标原点, 将方程右端在原点处作泰勒级数展开, 忽略二阶以上高次项, 则非线性系统化为

$$\dot{X} = AX + X_2(X) + H.O.T \quad X \in R^n \quad (3.7)$$

式中

$$A = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right]_{n \times n}, H^i = \left[\frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k} \right]_{n \times n}$$

作线性变换

$$X = UY$$

其中 U 满足 $A \times U = U \times J_r$, 得

$$\dot{Y} = J_r Y + Y2(Y) \quad (3.8)$$

其中 J_r 为矩阵 A 的特征值组成的对角矩阵。

再对式 (3.8) 作非线性变换

$$Y = Z + h2_r(Z) \quad (3.9)$$

使式 (3.8) 变换为

$$\dot{Z} = J_r Z \quad (3.10)$$

则式 (3.10) 即为 Normal Form(规范型), 向量 Z 称为 Normal Form 向量。

其具体的变换矩阵如下:

由式 (3.7) 可得 X 的某一元素

$$\dot{x}_i = A_i X + X^T H^i X / 2 + H.O.T \quad (3.11)$$

再由 $X = UY$ 可得 $Y = U^{-1}X = VY$

对 Y 的某一元素

$$y_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} x_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.12)$$

将式 (3.11) 代入式 (3.12), 则

$$\dot{y}_i = \sum_{j=1}^n V_{ij} \dot{x}_j = \sum_{j=1}^n V_{ij} (A_j X + X^T H^j X / 2) + H.O.T \quad (3.13)$$

下面根据矩阵 A 的特征值不同而分为三种情况进行讨论:

1) 矩阵 A 的特征值全为实数时

式 (3.13) 化为

$$\begin{aligned}\dot{y}_i &= \lambda_i y_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n V_{ij} Y^T U^T H^j U Y + H.O.T \\ &= \lambda_i y_i + Y^T C^i Y + H.O.T\end{aligned}\quad (3.14)$$

其中

$$C^i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n V_{ij} U^T H^j U \quad (3.15)$$

又由式 (3.9) 可得

$$y_i = z_i + Z^T h2_r^i Z \quad (3.16)$$

其中 $h2_r^i$ 为二阶变换矩阵, 使 $\dot{Z} = J_r Z$, 对式 (3.16) 两边求导得

$$\dot{y}_i = \dot{z}_i + (Z^T h2_r^i Z) = \lambda_i z_i + Z^T (J_r^T h2_r^i + h2_r^i J_r) Z \quad (3.17)$$

将式 (3.16) 代入 (3.17), 得

$$\dot{y}_i = \lambda_i y_i + Y^T C^i Y + H.O.T = \lambda_i (z_i + Z^T h2_r^i Z) + Z^T C^i Z + H.O.T \quad (3.18)$$

考察式 (3.17)、式 (3.18) 右端, 令其二阶项相等, 所得的变换系数 $h2_r^i$ 使得变换后式 (3.10) 成立。

此时

$$J_r^T h2_r^i + h2_r^i J_r = C^i + \lambda_i h2_r^i \quad (3.19)$$

因此有

$$h2_{jk}^i = \frac{C_{jk}^i}{\lambda_j + \lambda_k - \lambda_i} \quad (3.20)$$

2) 当矩阵 A 的特征值有一对复根时

此时

$$J_r = \begin{bmatrix} \alpha & \omega & & & \\ -\omega & \alpha & & & \\ & & \lambda_3 & & \\ & & & \lambda_4 & \\ & & & \dots & \\ & & & & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

则

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \alpha z_1 + \omega z_2 \\ \dot{z}_2 = -\omega z_1 + \alpha z_2 \\ \dot{z}_j = \lambda_j z_j \end{cases} \quad j = 3, \dots, n \quad (3.22)$$

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \alpha y_1 + \omega y_2 + Y^T C^1 Y \\ \dot{y}_2 = -\omega y_1 + \alpha y_2 + Y^T C^2 Y \\ \dot{y}_j = \lambda_j y_j + Y^T C^j Y \end{cases} \quad j = 3, \dots, n \quad (3.23)$$

将 $y_i = z_i + Z^T h2_r^i Z$ 代入式 (3.23), 得 \dot{y}_i 的表达式, 并将式 (3.16) 两端求导, 比较 \dot{y}_i 的表达式, 使得关于 Z 的二阶项相等, 与 1) 的推导思想类似, 可求得 $h2_r$ 。

3) 当矩阵 A 的特征值有任意对复根时

对于矩阵 J_r 阵, 每一行最多只有两个非零元素, 此时对应特征根为复数的情况。当该行有两个非零元素时, $h2_r^i$ 和 $h2_r^{i+1}$ 由下式确定:

$$\begin{aligned} J_r^T h2_r^i + h2_r^i J_r &= \alpha h2_r^i + \omega h2_r^{i+1} + C^i \\ J_r^T h2_r^{i+1} + h2_r^{i+1} J_r &= -\omega h2_r^i + \alpha h2_r^{i+1} + C^{i+1} \end{aligned} \quad (3.24)$$

其中 α , ω 对应于该特征根的实部和虚部。式 (3.24) 写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} J_r^T \\ J_r^T \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha E & \omega E \\ -\omega E & \alpha E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} h2_r^i \\ h2_r^{i+1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h2_r^i \\ h2_r^{i+1} \end{bmatrix} \times J_r = \begin{bmatrix} C^i \\ C^{i+1} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

矩阵方程式 (3.25) 可求得对应复数特征根的 $h2_r^i$ 和 $h2_r^{i+1}$ 。由此, 矩阵 A 有任意对复数根, 根据式 (3.25) 都可以求得非线性变换矩阵。

3.3.2 化为 Normal Form 后系统的稳定边界

将描述原系统的一组微分方程的坐标原点移至系统的主导不稳定平衡点后, 再将方程作 Normal Form 变换, 由 3.2.2 节可知, 式 (3.10) 的不变子空间与式 (3.7) 的不变流形有定理 3.4 所述的对应关系。

Z 空间中, 由于状态矩阵为对角矩阵, 则与特征值对应的特征向量有一个非零元素, 此时的平衡点为主导不稳定平衡点, 位于稳定边界上, 因此由 3.2.1 节可推论它为 I 型不稳定平衡点, 则 J_r 的对角元素只有一个为

正, 设为第 i 个, 那么式 (3.10) 的不变稳定子空间由向量 $(1, 0, \dots, 0)^T$, $(0, 1, \dots, 0)^T, \dots, (0, \dots, 1_{(i-1)}, 0, \dots, 0)^T, (0, \dots, 1_{(i+1)}, 0, \dots, 0)^T, \dots, (0, \dots, 0, 1)^T$ 张成, 不稳定子空间由向量 $(0, \dots, 1_{(i)}, 0, \dots, 0)^T$ 张成。因而不变稳定子空间的 $n-1$ 个向量实际上在 $Z \in R^n$ 空间里张成了一张超平面 $z_i = 0$ 。

由此, 可得:

定理 3.5: 式 (3.7) 在不稳定平衡点(原点)处的稳定流形经线性映射 $X = UY$ 和非线性映射 $Y = Z + h2_r(Z)$ 后, 是 Z 空间的超平面 $z_i = 0$ 。

因此, 式 (3.1) 在 I 型不稳定平衡点处的局部不变稳定流形实际上是在 X 空间的原象, 也就是式 (3.1) 的稳定边界在这一不稳定平衡点处的局部曲面。

3.3.2 稳定边界进行 Normal Form 变换的几何机理

首先讨论一下 Normal Form 变换的理论依据。

当非线性系统对应的线性系统的特征根全为实数时, 由式 (3.20) 可知其非线性变换矩阵为

$$h2_{ijk}^i = \frac{C_{jk}^i}{\lambda_j + \lambda_k - \lambda_i}$$

当 $\lambda_j + \lambda_k - \lambda_i = 0$ 时, 矩阵中有元素为无穷大, 此时非线性映射不存在, X 空间的二阶非线性系统不能映射到线性系统。这种情况称为谐振。

定理 3.6 (Poincare 定理): 若非线性系统在某不动点处无零实部特征根并且无谐振现象, 那么非线性系统在该不动点的邻域可以映射为其线性部分。

然后再分析 Normal Form 变换的几何意义。

由 Poincare 定理可知, 在电力系统的主导不稳定平衡点(双曲平衡点)处, 若特征根无谐振, 则系统可映射到其线性系统中, 即 $\dot{Z} = AZ$, 因为矩

阵 A 不为对角阵, 与特征根对应的特征向量不都与 Z 坐标系统的坐标轴平行, 那么线性系统 $\dot{Z} = AZ$ 的稳定子空间所张成的超平面不是 Z 坐标系统的坐标平面, 而是与各坐标平面成一定角度, 如图 3.1 所示。

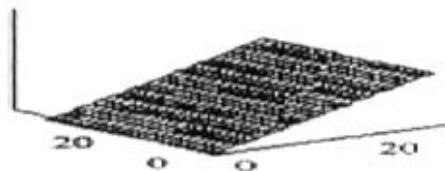


图 3.1 $n=3$ 时 $\dot{Z} = AZ$ 系统的稳定子空间所张成的超平面

Fig. 3.1 The extra-plane of stable sun-space of $\dot{Z} = AZ$ system ($n=3$)

当 $n>3$ 时这样的超平面无论在数学表达和直观性上, 都不如 $z_i = 0$ 的坐标平面, 因此线性变换 $Y = U^{-1}X = VX$ 实际上是坐标系的旋转, 使得经非线性变换后, 线性系统的稳定子空间为一坐标平面。

因此 Normal Form 变换的几何机理为: 对式 (3.1) 在主导不稳定平衡点处作超切平面, 如图 3.2(a), 再对式 (3.1) 作坐标旋转 $Y = U^{-1}X = VY$, 使得该超切平面与 $z_i = 0$ 的坐标平面平行, 如图 3.2(b), 旋转后的坐标系统为 Y , 在主导不稳定平衡点的邻域, 作非线性映射, 将局部不变稳定流形的二阶部分零化, 消除凹凸不平, 使得局部不变稳定流形映射为 $z_i = 0$ 的超平面, 如图 3.3 所示。

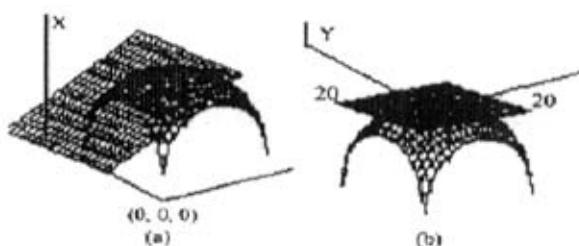
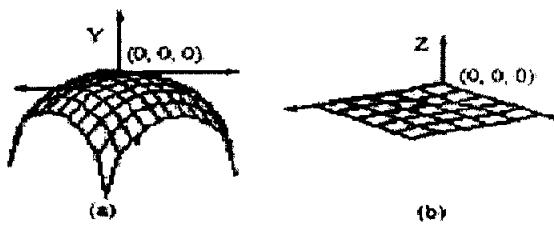


图 3.2 $n=3$ 时线性映射的几何机理

Fig. 3.2 The geometrical mechanism of linear mapping ($n=3$)

图 3.3 $n=3$ 时非线性映射的几何机理Fig. 3.3 The geometrical mechanism of nonlinear mapping ($n=3$)

3.3.4 原系统空间中的稳定边界及有效性分析

在原系统空间中, 即在系统的功角和角速度的状态空间下, 取第 n 台机为参考机, 取故障后系统的主导不稳定平衡点为系统的坐标原点, 电力系统的运动方程为:

$$\begin{aligned}\dot{\delta}_{in} &= \omega_{in} \\ \dot{\omega}_{in} &= \frac{1}{M_i}(P_i^{PF} - P_{ei}^{PF}) - \frac{1}{M_n}(P_n^{PF} - P_{ei}^{PF}) - \frac{D_i}{M_i}\omega_{in}\end{aligned}\quad i=1, 2, \dots, n-1 \quad (3.26)$$

将式 (3.26) 写为一般的形式为

$$\dot{X} = F(X) \quad (3.27)$$

式中 X 为 N 维列向量; F 为关于 X 的 N 维函数向量; 在 n 台发电机的电力系统中 N 的值为 $2n-2$ 。

采用 Normal Form 变换将式 (3.27) 映射到 Z 空间中为

$$\dot{Z} = J_r Z \quad (3.28)$$

现假设矩阵 A 的特征值全为实数, 即 J_r 为一个纯对角阵, 有

$$z_j = z_{j0} e^{\lambda_j t}$$

其中 z_{j0} 为初值。

又由式 (3.16) 得

$$y_j = z_j + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h2_{r_k}^j z_k z_l$$

$$\text{即 } y_j = z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n h2_{r_k}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t}$$

而

$$X = UY$$

即

$$x_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} y_j$$

所以

$$x_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} z_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n u_{ij} h2_{r_{kl}}^j z_k z_l \quad i=1,2,\dots,n \quad (3.29)$$

即

$$x_i = \sum_{j=1}^n u_{ij} z_j e^{\lambda_j t} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n u_{ij} h2_{r_{kl}}^j z_k z_l e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad i=1,2,\dots,n$$

由于 Z 空间中的局部稳定边界是 Z 空间的超平面 $z_i = 0$ ，所以令式 (3.29) 中的 $z_i = 0$ (其中 i 对应于 J_r 中唯一为正的对角元素)，则所求得的必然是原系统空间(X 空间)中的稳定边界。

现以单机无穷大系统(即二阶系统)为例加以分析。它的运动方程为：

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{M} (P_m - P_e) \end{aligned} \quad (3.30)$$

现假设在对式 (3.30) 所作的 Normal Form 变换中 λ_1 为正，即 $z_1 = 0$ 为局部稳定边界，将其变换到原系统空间中，得：

$$\begin{aligned} x_1 &= u_{12} z_2 + u_{11} h2_{r_{22}}^1 z_2^2 + u_{12} h2_{r_{22}}^2 z_2^2 \\ x_2 &= u_{22} z_2 + u_{21} h2_{r_{22}}^1 z_2^2 + u_{22} h2_{r_{22}}^2 z_2^2 \end{aligned} \quad (3.31)$$

在式 (3.31) 中，只有 z_2 为未知量，现给定 z_2 一系列值，则可以获得原系统空间中具体的局部稳定边界。

为了对所得到的稳定边界的有效性加以说明，本文先采用暂态能量函数方法求原系统空间中的完整稳定边界，然后再和式 (3.31) 所得到的局部稳定边界进行比较和分析。

单机无穷大系统的暂态能量函数为：

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M \omega^2 - P_m (\delta - \delta_s) - P_{em3} (\cos \delta - \cos \delta_s) \quad (3.32)$$

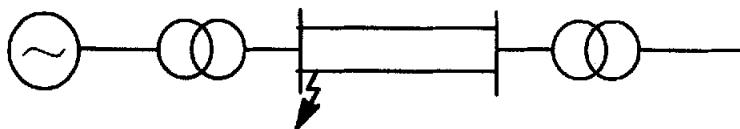
其中 δ_s 为事故后的稳定平衡点， P_{em3} 为故障后发电机最大电磁功率。

电力系统在主导不稳定平衡点 $\delta_u = \pi - \delta_s$ 处取得最大势能值 V_{max} ，它表示系统可能吸收的最大能量。倘若系统在故障后保持稳定，则系统在故障切除时刻的能量必须小于 V_{max} 。所以，对于函数 $V(\delta, \omega) = V_{max}$ 就表示系统的稳定边界，即为

$$\frac{1}{2} M \omega^2 - P_m(\delta - \delta_s) - P_{em3}(\cos \delta - \cos \delta_s) = V_{max} \quad (3.33)$$

暂态能量函数法所得到的稳定边界比较接近于真实的稳定边界，所以通过比较式 (3.31) 确定的局部稳定边界和暂态能量函数法得到的稳定边界 $V(\delta, \omega) = V_{max}$ ，就可以判断采用 Normal Form 变换方法在确定稳定边界方面的有效性。

下面通过单机无穷大系统的算例，比较上述两种方法所得到的稳定边界，进而加以分析。某一简单电力系统如图 3.4 所示。设双回输电线中一回的始端发生故障并切除。



240kW	300MVA	230km	200MVA	$u = 115kV$
10.5kV	10.5/242kV	$x_1 = x_2 = 0.42 \Omega /km$	220/121kV	$P_{j01} = 220MW$
$\cos \phi = 0.8$	$u_s \% = 14\%$	$x_0 = 4x_1$	$u_s \% = 14\%$	$\cos \phi_{j01} = 0.98$
$x_4 = 0.44$		$S_B = 200MVA$		
$T = 6s$		$U_B = 209kV$		

图 3.4 简单电力系统

Fig. 3.4 The simple power system

通过计算，并由式 (3.31) 可得原系统空间中的稳定边界为：

$$x_1 = 0.0051 \times z_2^2 - 0.1671 \times z_2$$

$$x_2 = -0.0606 \times z_2^2 + 0.9859 \times z_2$$

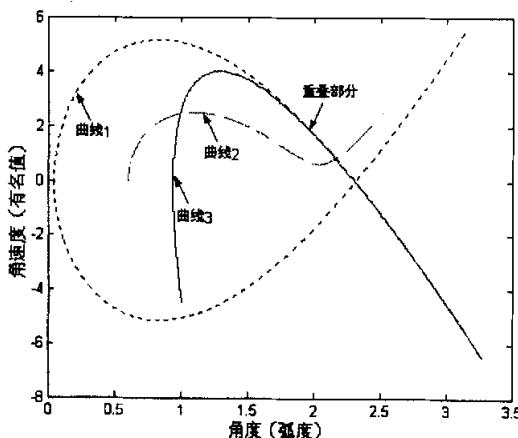
其中 x_1 即为 δ ， x_2 为 ω 。

当采用暂态能量函数方法时，由式 (3.33) 计算出的稳定边界为

$$\frac{1}{2} M \omega^2 - P_m(\delta - \delta_s) - P_{em3}(\cos \delta - \cos \delta_s) = 0.3466$$

这表示 $V_{max} = 0.3466$ 。

上述两种方法所得到的稳定边界的差异如图 3.5 所示。



其中：曲线 1 代表用暂态能量函数法所确定的稳定边界

曲线 2 代表单相短路故障的持续故障轨迹

曲线 3 代表用 Normal Form 变换确定的稳定边界

图 3.5 两种方法得到的稳定边界的比较

Fig. 3.5 The comparison of stable boundary obtained by 2 methods

从图 3.5 中可以看出，采用 Normal Form 变换方法所确定的稳定边界是一个局部稳定边界，它只在主导不稳定平衡点附近是有效的。

最后，对 Normal Form 变换方法作一点说明：

Normal Form 变换方法是将非线性系统在平衡点处进行一次线性映射和一次非线性映射，即将原系统映射到 Z 空间，最后化成线性系统 $\dot{Z} = J_r Z$ 。它不同于直接将非线性系统在平衡点处线性化，后者是不通过非线性映射而直接在原系统空间中线性化而得到线性系统 $\dot{X} = AX$ ，这种线性系统对原来的非线性系统的模拟具有比较低的精度。

现就线性系统 $\dot{X} = AX$ 进行讨论，并分析一下它的稳定子空间所确定的原非线性系统的稳定边界，并和 Normal Form 变换方法确定的稳定边界作一对比。

对线性系统 $\dot{X} = AX$ 作线性变换

$$X = UY$$

可得

$$U\dot{Y} = AUY$$

即

$$\dot{Y} = U^{-1}AUY = J_r Y \quad (3.34)$$

其中 U 满足 $A \times U = U \times J_r$, J_r 为矩阵 A 的特征值组成的对角矩阵。

由于系统 $\dot{Y} = J_r Y$ 的状态矩阵也为对角矩阵, 所以与 3.3.2 中的分析类似, 该系统的不变稳定子空间的 $n-1$ 个向量实际上在 $Y \in \mathbb{R}^n$ 空间里张成了一张超平面 $y_i = 0$ 。

与 3.3.4 同理, 这种直接线性化的方法在原非线性系统空间中确定的稳定边界为

$$x_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n u_{ij} y_j \quad (3.35)$$

其中 k 对应于 J_r 中唯一为正的对角元素。

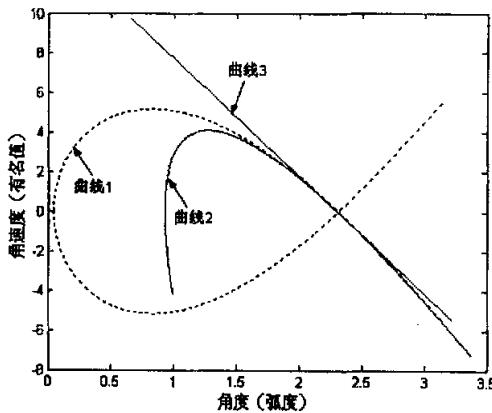
对于单机无穷大系统, 设 λ_1 为正, 则式 (3.35) 将变为

$$\begin{aligned} x_1 &= u_{12} \times y_2 \\ x_2 &= u_{22} \times y_2 \end{aligned} \quad (3.36)$$

仍以图 3.4 的算例来计算, 其所确定的稳定边界为

$$\begin{aligned} x_1 &= -0.1671 \times y_2 \\ x_2 &= 0.9859 \times y_2 \end{aligned}$$

这种直接线性化的方法和采用 Normal Form 变换的方法所确定的稳定边界如图 3.6 所示。



其中：曲线 1 代表用暂态能量函数法所确定的稳定边界

曲线 2 代表用 Normal Form 变换确定的稳定边界

曲线 3 代表用直接线性化的方法确定的稳定边界

图 3.6 两种方法得到的稳定边界的对比

Fig. 3.6 The comparison of stable boundary obtained by 2 methods

由图 3.6 可以看出，在主导不稳定平衡点附近，采用 Normal Form 变换方法确定的稳定边界要比直接线性化方法所确定的更接近于实际的稳定边界，所以前者要比后者更有效。二者之间的实质差别可由式 (3.29) 和式 (3.35) 看出，式 (3.35) 实际上是式 (3.29) 的一阶项，即是其线性部分，而式 (3.29) 还包括了二阶项，所以在对稳定边界的模拟方面，采用 Normal Form 变换的方法要优于直接线性化的方法。

3.4 小结

本章首先叙述了非线性系统的稳定域边界理论，由于受扰动后的非系统稳定域边界是由位于稳定边界上的不稳定平衡点的稳定流形的并集构成，所以先对非线性系统的稳定边界和稳定流形之间的关系给予了详细的说明，同时又对非线性系统的不变稳定流形与线性系统的不变稳定子空间之间的对应关系作了介绍，以此来建立非线性系统的稳定边界与线性系统的稳定子空间之间的关系。然后，本章着重介绍了 Normal Form 变换的具体方法，推导了一些变换的具体公式，在此基础上对进行 Normal Form 变换后的系统稳定边界的性质及几何机理作了说明，由于在 Z 空间中的稳定边界是一个超平面 $z_i = 0$ ，所以本文根据这个性质又推导了原系统空间中的

稳定边界的具体表达形式，并且将所推导的稳定边界与暂态能量函数法所得到的稳定边界作了比较分析，结果表明采用 Normal Form 变换方法所得到的稳定边界是局部稳定边界，它只在主导不稳定平衡点附近是有效的，同时论述了采用 Normal Form 变换方法和直接将系统进行线性化的方法所确定的稳定边界的实质性差别，即后者实际上是前者的一阶项，所以，在对非线性系统的稳定边界进行模拟方面，采用 Normal Form 变换方法要优于直接将系统进行线性化的方法。

第4章 故障临界切除时间的确定

4.1 引言

电力系统暂态稳定指的是系统突然经受大扰动后，各个同步电机能否继续保持同步运行的能力。通常所考虑的扰动包括发生各种短路故障、切除大容量发电机或输电设备以及某些负荷的突然变化等。

在电力系统中，当发生短路故障时，一般由保护元件切线路、切负荷、切发电机。对于故障的切除而言，应该是越早越好。如果不能及时切除，可能会导致系统失去稳定性。因此，存在一个临界切除的状态，该状态所对应的时间就称为故障的临界切除时间。

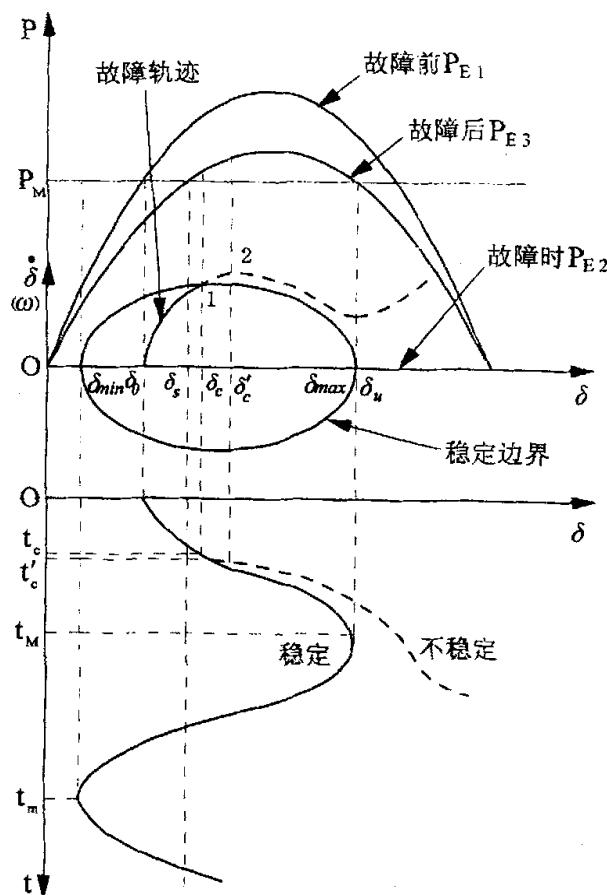
针对某个故障而言，如果知道了它的临界切除时间，那么就可以根据这个临界切除时间来对系统进行控制和分析。即如果系统的实际切除时间小于临界切除时间，那么可以初步判断系统是暂态稳定的，反之，则系统是暂态不稳定的。因此，故障临界切除时间在电力系统的暂态稳定分析中有着极其重要的意义。

4.2 采用 Normal Form 变换确定临界切除时间

4.2.1 确定临界切除时间的依据

在数值仿真法中，不能直接计算系统的故障临界切除时间，而只能通过反复试凑切除时间观察系统是否临界稳定的方法来得到故障临界切除时间。由于这种方法每次给定一个切除时间时，都要重新计算系统，所以花费了很多计算时间，实时性较差。本文将采用另外一种方法，即通过判断持续故障轨迹何时和稳定边界相交来得到故障临界切除时间。

为了说明这种方法的可行性，仍以单机无穷大系统为例。图 4.1 给出了功角曲线、 $\delta-\dot{\delta}$ 相平面图以及相角随时间的变化曲线。

图 4.1 δ - $\dot{\delta}$ 相平面图及角度一时间特性曲线Fig. 4.1 The chart of δ - $\dot{\delta}$ phase plane and degree-time curve

在图 4.1 中, 若故障轨迹在到达点 1 之前切除, 由 δ - t 曲线知系统是稳定的; 若超过点 1 之后切除, 如在点 2 时切除故障, 则系统是不稳定的。因此, 点 1 即为故障的临界切除点, 它所对应的轨迹即为临界故障轨迹, 所对应的切除时间即为故障临界切除时间。具体而言, 若故障在点 1 处切除 (即对应临界状态), 并且不考虑阻尼的影响, 则其临界轨迹的理想情况应该是从 δ_0 出发到达点 1, 再从点 1 沿着稳定边界到达 δ_u , 最后沿着稳定边界作等幅振荡。同时, 点 1 也是持续故障轨迹在主导不稳定平衡点 δ_u 的局部不变稳定流形上的出口点, 所谓持续故障轨迹就是故障没有被切除

时系统的状态量的运动轨迹。

由以上分析可知，电力系统经大扰动后的故障临界切除时间可以通过判断持续故障轨迹何时与主导不稳定平衡点处的不变稳定流形（即稳定边界）相交来获得。

为了说明这种方法的有效性，现以这种方法所得到的故障临界切除时间和数值仿真法所得到的临界切除时间作一对比，算例仍采用图 3.4 的系统，结果如表 4.1 所示。

表 4.1 两种方法所得临界切除时间的比较

Table 4.1 The comparison of critical clearing time (CCT) between 2 methods

故障类型	故障临界切除时间(s)	
	数值仿真法	持续故障轨迹和稳定边界相交的方法
三相短路	0.134	0.134
两相短路接地	0.197	0.198
两相短路	0.364	0.362
单相短路	1.150	1.146

由表 4.1 可以看出，这种方法所得到的结果比较接近于数值仿真法的结果，因此是有效的。

4.2.2 Z 空间中临界切除时间的确定

在 Z 空间中，为了判断持续故障轨迹何时与稳定边界相交来求得故障临界切除时间，要将持续故障轨迹映射到 Z 坐标系统中，得到新的持续故障轨迹，又由于在 Z 空间中的稳定边界是 $z_i = 0$ ，所以只要判断新的持续故障轨迹的第 i 维分量何时过零或变号，就表示和稳定边界相交，对应的这个时间就是故障临界切除时间。因此，可推出以下确定暂态稳定的临界切除时间的定理：

定理 4.1：将电力系统非线性微分方程组在主导不稳定平衡点处作 3.3.1 中所述的变换，再将持续故障轨迹映射到 Z 空间，判断 Z 空间中持续故障轨迹的第 i 个分量是否过零，则可确定持续故障轨迹是否到达临界切除时间。

4.2.3 原系统空间中临界切除时间的确定

在原系统空间中, 根据 3.3.4 中的论述, 可以得到主导不稳定平衡点附近的局部稳定边界, 并且在该空间中的持续故障轨迹可直接获得, 不需作任何映射, 所以可以得到原系统空间中确定临界切除时间的定理:

定理 4.2: 将电力系统非线性微分方程组在主导不稳定平衡点处作 3.3.1 中所述的变换, 再令 Z 空间中的第 i 个分量为零(其中 i 对应于 J , 中唯一为正的对角元素), 由式 (3.29) 可得原系统空间中主导不稳定平衡点处的局部稳定边界, 判断该空间中的持续故障轨迹何时与局部稳定边界相交, 则可确定故障临界切除时间。

这里需作一点说明, 定理 4.2 中的过程是直接在原系统空间中求故障临界切除时间, 不用对持续故障轨迹作变换, 这可以避免持续故障轨迹的多值映射, 而在定理 4.1 中, 持续故障轨迹从原系统空间变换到 Z 空间是一对多的映射, 即原系统的一条持续故障轨迹将映射成 Z 空间中的多条持续故障轨迹, 因此需要判断出正确的持续故障轨迹, 这将使故障临界切除时间的计算更加复杂。

4.2.4 电力系统的稳定裕度

在电力系统暂态稳定分析的直接法中, 稳定裕度是用能量来度量的, 即能量裕度, 它的定义是: $\Delta V = V_{cr} - V_c$, 其中 V_{cr} 是系统的临界能量, V_c 是故障切除时系统具有的总能量。仿照能量裕度的定义, 也可以定义时间裕度为: $\Delta t = t_{cm} - t_c$, 其中 t_{cm} 是故障临界切除时间, t_c 是故障切除时间。

用时间裕度来度量电力系统的稳定裕度, 比能量裕度更加直观, 对于运行人员而言容易接受, 并且能使他们对电力系统的运行状态有一个较清晰的认识。

4.3 算例及有效性分析

为了验证采用 Normal Form 变换方法确定故障临界切除时间的有效性, 本文进行了大量的算例计算。为方便起见, 仍以图 3.4 为算例, 两种空间中的计算结果如表 4.2 和表 4.3 所示。

表 4.2 临界切除时间的比较 ($P_{\text{th}} = 220\text{MW}$)Table 4.2 The comparison of critical clearing time ($P_{\text{th}} = 220\text{MW}$)

空间	故障类型	故障临界切除时间(s)	
		数值仿真法	Normal Form 变换法
Z 空间	三相短路	0.1340	0.1340
	两相短路接地	0.1970	0.1815
X 空间	两相短路	0.3640	0.3582
	单相短路	1.1500	1.1463

表 4.3 临界切除时间的比较 ($P_{\text{th}} = 240\text{MW}$)Table 4.2 The comparison of critical clearing time ($P_{\text{th}} = 240\text{MW}$)

空间	故障类型	故障临界切除时间(s)	
		数值仿真法	Normal Form 变换法
Z 空间	三相短路	0.1230	0.1228
	两相短路接地	0.1810	0.1712
X 空间	两相短路	0.3550	0.3436
	单相短路	1.1380	1.1355

由表 4.2 和表 4.3 可见, 在 Z 空间中确定严重故障时 (如三相短路) 的临界切除时间较为有效, 它的结果与数值仿真法所计算的结果接近, 而在原系统空间 (即 X 空间) 中确定轻微故障 (如单相短路) 时较为有效。现对上两种情况分别进行分析。

在 Z 空间中求解故障临界切除时间时, 要将原系统空间中的持续故障轨迹映射到 Z 空间中, 而从 X 空间到 Z 空间的 Normal Form 变换对持续故障轨迹而言是一种近似线性化的过程, 严重故障时的持续故障轨迹的线性化程度较高, 故在 Z 空间中求取严重故障时的临界切除时间具有较高的精度。

在原系统空间中, 不需对持续故障轨迹做映射, 但该空间中的稳定边界是 Z 空间中的超平面 $z_t = 0$ 的原象, 它只在主导不稳定平衡点附近是有效的, 是一个局部稳定边界, 而轻微故障时的持续故障轨迹能够与该局部稳定边界相交, 所以在原系统空间中求取轻微故障时的临界切除时间精度较高。

通过以上的分析可知, 如果在两个空间中根据不同故障类型分别进行计算, 即在 X 空间中针对轻微故障, 而在 Z 空间中针对严重故障, 则对各种故障类型求临界切除时间都可以获得很好的精度, 而且, 用 Normal Form 变换方法只通过对持续故障轨迹进行一次积分就可求得故障临界切除时

间，因而计算方便，计算速度也比较迅速。在得到了故障临界切除时间后，通过它和系统实际切除时间的比较就可以判断系统是否稳定，并且系统的稳定裕度可由临界切除时间和实际切除时间相减来求得，这种用时间来度量系统的稳定裕度比用能量度量更加直观。

4.4 小结

本章首先介绍了电力系统中故障临界切除时间的重要意义，并对数值仿真法如何计算临界切除时间做了说明，由于它是采用反复试凑切除时间的方法，并且每次给定一个切除时间时都要重新计算系统，因而计算繁琐，计算速度慢，为了方便快速求得故障临界切除时间，本章提出了通过判断持续故障轨迹何时与稳定边界相交来确定故障临界切除时间的方法。为了说明这种方法的可行性和有效性，本文从理论上及算例上均给出了详细分析。由于采用 Normal Form 变换方法在两个空间（Z 空间和原系统空间）中可以很容易求得局部稳定边界，并能给出解析的形式，而且持续故障轨迹也可方便的获得，所以使得判断二者何时相交确定故障临界切除时间的计算方法较为方便和迅速。然后，对两个空间中如何计算出故障临界切除时间进行了详细论述，并给出了时间裕度的定义，通过大量的算例表明，利用持续故障轨迹和稳定边界相交来求取故障临界切除时间的方法，在 Z 空间中针对严重故障时较为有效，而在原系统空间中计算轻微故障时的精度较高。最后，对这两种情况进行了分析和研究，并对在两个空间中根据不同故障类型分别计算故障临界切除时间的前景进行了展望。

第5章 基于临界切除时间的暂态稳定预防控制

电力系统暂态稳定安全控制的重要性日益增加，在电力市场条件下尤其如此。安全分析的定量化问题在电力市场环境中将越来越重要，这是电网互联和电力市场发展使电力系统的动态行为越来越复杂的必然结果。对动态安全评估和控制的研究已经成为国际大电网会议近年来的一个重要议题^{[62][63][64][65]}。

考虑到电力系统预防控制的重要性，结合第3章中的临界切除时间的计算方法，本章对电力系统动态安全控制领域中的发电机出力的预防控制作了一定的研究。本章的重点在于如何确定电力系统暂稳问题中发电机出力的改变量。

5.1 暂态稳定预防控制概述

目前电力系统运行中对动态安全控制特别是在线动态安全控制的要求日益提高，也相应地提高了有关分析方法在快速性及准确性上的要求。保证电力系统的安全稳定运行是当前人们极为重视的问题，也是极为重要的问题。电力系统安全稳定控制分为预防控制和紧急控制两种。本文将对电力系统安全稳定控制特别是在线安全控制作简略的介绍。

5.1.1 电力系统安全稳定控制

电力系统动态安全稳定控制^{[66][67][68]}主要有预防控制和紧急控制两种：

①预防控制(Preventive control):电力系统正常运行时由于运行方式恶化或扰动等处于警戒状态，为提高运行安全稳定裕度，使电力系统恢复至安全状态而进行的控制。预防控制是在扰动未发生时就通过改变运行条件将系统运行点引入安全状态，因此它能在扰动瞬间就起作用，性能代价比较好。但由于在没有扰动时也会增加运行费用，故不可能采用控制代价大的措施。

②紧急控制(Emergency Control): 电力系统因扰动而进入紧急状态或

特急状态，为防止系统稳定的破坏和运行参数严重超出允许范围，以及防止事故进一步扩大造成严重停电而进行的控制。对于紧急控制来说，只在检测到特定扰动后才采取措施，以扩大稳定域，因此紧急措施在扰动初期来不及起作用。虽然平时并不增加运行费用，但一旦发生扰动，必须采用较激烈的措施，控制的代价大。

预防控制和紧急控制是维持电力系统安全运行的两种重要手段，二者是不可分割的，具有很强的互补性，并且在实际应用中应该相互协调、结合考虑。

紧急控制一旦采用，就必须采用较激烈的措施，控制的代价大。在没有代价较小的紧急控制方法时，在线预防控制成为了系统安全控制的主要方面。特别是在电力市场环境中，因为市场竞争将更加突出电力系统经济和安全性的优化问题，经济性和稳定性在电力市场中将更加复杂地相互制约，为此必须在线实施动态安全控制。

5.1.2 在线安全稳定控制

目前的在线稳定监视方法大多采用离线决策^{[67][69][70]}，在线匹配的方法：离线对各预想典型工况和预想故障集进行积分试探，求出重要参数的稳定极限和综合的预防措施，并建立数据库来存储；在线运行时，将实际工况近似地与数据库中的最相似的预想工况匹配，将该预想工况下的决策近似地代替理想的决策，为调度员提供决策支持。这种方法存在不足之处：若数据库中没有相近的预想工况，则决策将无法进行。

为此可按实际工况和预想故障集，在线准实时地(如在一个计算周期内)选择最优的预防措施，这样就不会出现工况的匹配误差或失配问题。值得指出的是：一种工况动态安全评估的输出结果反过来还可以被另一种工况的动态安全评估所用，以进一步提高实时计算速度。也即是说前一次的分析结果可作为后一次分析的初值，应用得当能显著提高分析速度。这一作法有较好的参考意义。

从系统的角度而言，在线动态安全分析主要包括以下几个部分：系统状态的更新、系统的模型、稳定分析算法等等。

当然，在线动态安全评估中最重要的部分是电力系统模型和稳定分析

算法。首先动态安全评估必须建立在一个合适的、精确的电力系统模型之上。其次，核心的稳定分析算法分为两部分，即用于事故筛选的快速算法和用于严重故障分析的详细算法。事故筛选的快速算法为了保证其快速性，可以采用经典模型并用速度很快的直接法。但无论怎么简化，都必须保证筛选的正确性，即不能把严重故障误判为轻微故障，而且尽量把所有轻微故障筛选掉。而为了保证分析结果的精度，详细算法应该用时域仿真法。为了验证和确保在线安全分析的正确性，详细算法应与离线算法相结合，定期对在线分析的结果进行离线校核分析。

在线动态安全评估的另一重要部分是系统状态的实时更新。状态更新有三种方式：定时更新、事件驱动自动更新和人工更新。更新的依据大致如下：考虑到电力系统的实际情况以及准实时地反映系统状态的要求，一般每 5 min 定时更新一次系统状态^{[62][66]}；系统状态发生大的变化时（如双回线断开一条或运行方式改变）应能自动进行状态更新；调度员亦应能够进行人工更新状态的操作。这三种更新方法应是互为补充的，在在线动态安全分析中实现状态更新的必要的手段。

与离线分析相比，在线动态安全评估的最大不同之处在于：其计算过程必须能实时反映电力系统的真实状态，因此需要定时或自动更新数据；为了提高分析速度，避免不必要的计算负担，需有一个高效、准确的事故筛选程序，能尽量剔除轻微故障，保留所有严重故障以进行详细分析；需要一个友好的输入输出界面，能提供直观明确的计算结果，使调度员能知道系统目前的稳定状况。

本文主要对在线安全分析的核心稳定分析算法上作了一定的研究，主要着眼于对事故筛选及稳定极限的计算方法，而对系统状态的更新方法没有深入研究。

5.1.3 暂态稳定预防控制方法概述

①暂态稳定预防控制应该满足下面五个方面的要求^[72]：

- 1)能同时考虑其它问题，如负荷的经济分配、电压稳定和传输功率的限制等。
- 2)能同时考虑几个事故：成功的预防控制措施不仅仅是指它能在发生一个事故时使系统保持稳定，也意味着它能处理多个事故同时发生的情

形。

- 3)能每隔5—10分钟针对负荷变化的情况实现预防控制。
- 4)能知道系统的稳定程度:实施预防控制后,人们总期望能够了解系统在控制前后的稳定程度。可行的指标有临界切除时间CCT和暂稳裕度。
- 5)能够利用暂态稳定控制监测所得到的数据。利用暂稳监测的数据能够大大缩短决定预防控制所采取的措施的计算时间。

②预防控制的实现方法主要有以下两种:

- 1)监视运行参数并与目标值进行比较。如对系统功角、线路潮流、母线电压、系统频率等实际运行参数进行监视,并与事先确定的运行目标值进行比较,如不一致则进行必要控制以消除这种差别。
- 2)按假设故障仿真进行监视。根据系统的在线运行信息,按当时或以后短时(数分钟至数小时)可能的变化情况,假设各类故障进行仿真,如仿真结果出现稳定问题或参数严重越限,则进行相应控制以消除不安全因素。

③暂稳预防控制的内容有功角控制及电压控制,其中功角控制为主。功角控制的实现手段有:发电机功率控制、负荷转移或切除、开合线路改变电网结构。

对发电机功率的控制也即是动态安全调度是电力系统动态安全分析的重要内容。它是指通过调节发电机的有功功率,提高系统的暂态稳定水平,使得系统在某些事故下由暂态不稳定变为暂态稳定,以防止事故扩大引发的大规模停电事故(亦有文献称之为:发电机功率动态预防控制、考虑稳定性约束的有功发电再调节等)。

目前发电机出力预防控制的研究主要集中于如下几个方面^{[73][74][75]}:

- 1)基于暂态能量函数(TEF)等各种直接法,其原理是利用稳定裕度相对于发电机组有功和无功的灵敏度来确定发电机组输出功率的修正值。这种分析是十分费时的,即使系统控制中心的计算能力不断增加,预防控制仍然停留在实验阶段。

- 2)用神经网络^{[76][77]}、启发式方法^{[78][79]}、模式识别方法确定各发电机组的安全经济出力。智能化方法在非线性逼近和对参数的自适应方面能弥补精确方法的不足,其缺点在于很难做到样本空间和规则的完备。由于训练神经需要足够数量的样本,对于大型电力系统要想获得全面的样本是十分困难的。

3)将发电机组出力经济调度作为优化问题处理,将电力系统安全性与经济合理性同时考虑。其关键在于如何解决计算量大的问题,以满足在线计算的要求。

本章主要对在线安全评估中的发电机再调节量的确定进行了有关研究,而对其它部分例如如何实现在线控制,监视量的获取等均不作为本章的研究内容。当然,发电机的动态安全调度仅是电力系统预防控制中的一部分,需要与其它措施协调。

5.2 基于 CCT 的发电机出力的暂态稳定预防控制

5.2.1 引言

电力系统在经受大扰动后,能否继续保持同步,保证暂态稳定性,是电力系统的重要研究内容^{[69][77]}。但在工程实践中,运行部门不但想知道系统在给定大扰动及故障操作条件下能否维持暂态稳定性,更想知道系统在此大扰动下的暂态稳定极限(如系统出力极限和重要线路的传输极限功率等),以便在系统安全条件下,加大出力,促进系统的经济运行,以及为系统安全经济调度和预防控制提供极有价值的信息。

电力系统暂稳极限功率,一般是指发电机极限功率和联络线传输极限功率。它主要与系统的结构参数和运行工况、故障类型和故障位置以及故障切除时间等直接相关。在进行暂稳分析时,发电机的暂稳极限功率比故障极限切除时间更令系统运行调度人员感兴趣,因为暂稳功率极限更适合于安排电力系统的运行方式。

5.2.2 临界切除时间与最临界机输出功率的关系

文献[77][83]指出在最严重事故下,临界切除时间和故障母线上最临界机的输出之间的关系为线性的,因此据此可提出暂态稳定评估和暂态稳定预防控制方法。

5.2.3 事故筛选

本文的暂态稳定预防控制方法需要一种能快速筛选出电力系统中严重事故的筛选方法和能快速地给出所有发电机输出变化量的方法。事故筛选是动态安全评估中十分重要的一步。事故筛选部分给出的输出结果主要是为进一步的严重故障详细分析服务的，它将所有候选事故划分为两部分，即轻微故障和严重故障，同时将所有严重故障按某个稳定裕度指标从小到大排序，使调度员能提前从总体上对系统的稳定状况有一个定性的认识。在对严重故障进行详细分析以后，对真正严重的故障必须给出诸如稳定裕度和稳定极限等调度员容易理解和接受，并且能对调度员的预防操作起一定指导作用的输出信息。它决定了前面所有复杂计算是否能起实际作用，并直接影响整个动态安全评估系统的优劣。

事故筛选是动态安全评估中最费时的一步，因为系统可能有成百上千种故障情形。而目前电力系统日益庞大和复杂，因而需要考虑的事故的数目很大。因此为完成在线暂稳预防控制，需要一个能找出严重事故的快速筛选方法。传统的时域仿真法虽然能够精确地判断出严重事故，但是需要很长的计算时间。目前用于动态安全分析预想事故筛选及排队的方法主要有两大类，即暂态能量函数法与人工神经网络方法。而人工神经网络方法的一个严重缺陷是误分类问题，特别是不安全状态的漏报，这严重阻碍了它的实际应用。本文中的事故筛选是基于直接法的，采用临界切除时间 CCT 作为系统暂态稳定程度的指标。与其它指标相比，临界切除时间便于运行人员了解运行期间系统的稳定程度。预防控制需要一个高效的事故筛选程序以便找出那些 CCT 小于预先给定的目标 CCT 的事故，事故筛选应尽可能地快速完成。

为了得到较为准确的事故排序，但同时又要求计算方法不能过于复杂、计算速度不能太慢，以满足动态安全分析的需要，本文采用首先用考虑简单模型的直接法进行粗略计算，筛选出较为严重的事故情形，然后用更精确的方法作进一步分析。图 5.1 给出了本文采用的分析方法的示意图。相应的步骤为：

- ①用直接法中的扩展等面积法计算临界切除时间的初始值 CCT₀；
- ②以 CCT₀ 开始，用第四章中的方法对所筛选出来的事故作进一步分

析并排序。

一些文献指出，扩展等面积法对大多数事故能给出精度能够接受的临界切除时间，但也有大约 10% 左右的事故有较大的偏差。因此对所筛选出的事故进行进一步的分析是十分必要的，这同时也是提高动态安全分析速度的一个重要途径。

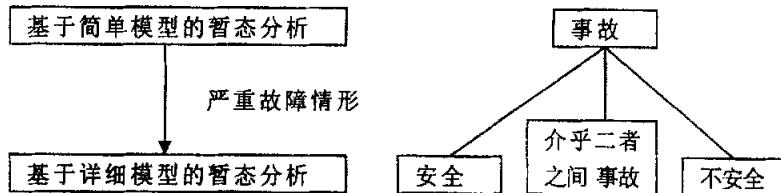


图 5.1 事故筛选示意图

5.2 事故分类

Fig.5.1 Sketch map contingency screening Fig.5.2 Contingency classification

目前事故筛选是通常将事故简单地分为稳定或不稳定，只有不稳定的事故才需要进一步详细地分析并采取相应的预防控制措施。这种分类准则存在诸多不足之处，尤其是不便于各种暂态稳定控制措施的实施。考虑到这种分类方式的局限性，在事故筛选时进一步细化事故的分类是必须的。事故筛选时可将事故分为三类：安全、不安全以及介乎二者之间，如图 5.2 所示。这种分类方法便于进行预防控制。对一个不稳定系统而言，某些事故一旦出现就会导致系统失稳。为了使系统保持稳定，需要调整临界机的输出功率。但为了满足负荷的需求，其它非临界机的输出功率应该相应地增加。但在出现除此以外的某些使系统接近失稳的事故时，由于增加了某些发电机输出功率，系统可能会因此而失稳。为了避免这种情形的发生，本文提出在事故排序时将发电机分为三类，并且只有稳定的发电机才会增加其功率输出。

5.2.4 基于 CCT 的发电机出力暂稳预防控制方法的实现

本文第三章中提出了一种临界切除时间的快速计算方法，当然这种计算方法的计算精度很高，因此本文在进行事故筛选中的详细筛选时利用了本文所提出的临界切除时间的计算方法，并在发电机出力预防控制中将临界切除时间作为稳定度指标。这里，利用 CCT 来实现的在线预防控制的思想如下：

①对于在线稳定预防控制而言,如同负荷的监视一样,CCT的数值也是每隔5—10分钟计算一次。采用发电机功率再调节的预防控制措施,需要一定的时间来完成预防控制的有关计算。所需的具体时间的大小与发电机本身特性、发电机输出变化量的数值有关。

②如果所有的CCT都大于预先给定的标准数值(这个数值大于电力系统中断路器的实际动作时间),则不需要任何预防控制操作。如果一个或多个事故的CCT小于预定值,则需要进行预防控制操作。

在事故筛选及事故排序以后,可以进行发电机功率再调节的预防控制。下面将阐述本文中的发电机功率控制的方法。发电机出力的再调节中,计及了每台发电机的发电能力。为了能在暂态稳定问题中衡量每台发电机剩余的发电能力以便据此决定出在不稳定事故发生时每台发电机的输出功率的改变量,本文引入了发电裕度的概念。第*i*台发电机的发电裕度定义为:

$$\Delta C_i = \frac{C_i - P_{ei}}{C_i} \quad (5.1)$$

其中, C_i 为第*i*台发电机的额定发电能力;

P_{ei} 为第*i*台发电机目前的输出。

定义每台发电机的发电裕度的原因在于发电裕度能反映出该发电机当前所剩余的发电能力。在发电机输出功率预防控制中,由于稳定的发电机群拥有较大的发电裕度,因而其输出将会增加;而不稳定的机群则拥有较小的发电裕度,因而其输出将会减少。据此可以提出一种新的发电机输出功率重新计划方法,如等式5.2、5.3所示。其中 ΔP_{ef} 是最严重故障下故障母线上相连的发电机的输出的变化量。

$$\Delta P_{ei} = \frac{\frac{1}{\Delta C_i} \Delta P_{ef}}{\sum_{k \in B} \frac{1}{\Delta C_k}}, \quad i \in B \quad (5.2)$$

$$\Delta P_{ei} = \frac{\Delta C_i}{\sum_{k \in B} \Delta C_k} \times (\text{全部减少量}) \quad , i \in A \quad (5.3)$$

其中, A 为稳定机群, B 为不稳定机群; 全部减少量=发电机输出减少量之和。

在上述方法中, 如果 ΔP_{eff} 的值已知, 则系统中所有发电机的输出变化量都可以计算得到。前文已经指出: ΔP_{eff} 的值是利用临界切除时间 CCT 与最严重故障下故障母线上相连的发电机的输出之间的线性关系来求得。在计算出所有发电机输出功率的变化量以后, 就可以按照这个改变量实施发电机的预防控制以便将工作运行点引入安全稳定域内。然后, 重新进行故障筛选, 看是否存在不稳定事故。

若通过预防控制仍不能使不稳定事故变成稳定, 脱离不稳定域, 则应重新进行预防控制。但这时以前减少功率输出的发电机则不应增加输出, 因为通过前一次的预防控制已经变成稳定的事故仍有可能重新失稳。

5.3 仿真算例

为了验证本文所提出的预防控制方法, 本文对典型的 9 机 20 母线系统进行分析。相应的发电机常数参见表 5.1。

表 5.1 9 机 20 母线系统的发电机参数

Table 5.1 Parameters of 9 machine 20 bus power system

序号	发电机	额定容量 (MVA)	额定输出 (MW)	惯性常数	暂态电抗
1	G1	11111.11	10000	6	0.32
2	G2	11111.11	10000	6	0.32
3	G3	5555.55	5000	6	0.32
4	G4	555.55	500	6	0.32
5	G5	1666.66	1500	6	0.32
6	G6	555.55	500	6	0.32
7	G7	555.55	500	6	0.32
8	G8	555.55	500	6	0.32
9	G9	1666.66	1500	6	0.32

①事故筛选

本文考虑了靠近发电机的带有星号的点 1~11 发生三相对地短路、并在 $t=t_{c1}$ 时跳开双回线的其中一回线路的故障情形。此处设 $t_{c1}=0.2s$ 。事故

筛选的结果如表 5.2:

故障 5 为最严重故障, 其故障时间小于预先设定的目标时间, 并将使系统失稳。因此应对这种故障情形进行预防控制以使其保持稳定。

表 5.2 事故筛选结果(初始条件)

Tables.2 Screening results(initial condition)

故障排序	故障点	支路	CCT (s)
1	5	16, 15	0.18
2	6	16, 17	0.18
3	11	20, 13	0.18
4	10	20, 19	0.21
5	4	15, 16	0.22
6	2	15, 14	0.22
7	3	15, 19	0.23
8	9	19, 20	0.24
9	8	19, 15	0.25
10	7	19, 18	0.25
11	1	12, 13	0.33

表 5.3 发电裕度

Table5.3 Generation margin

发电机	额定容量 (MVA)	当前输出	发电裕度
G3	5555.55	4343.86	0.218
G4	555.55	420.00	0.244
G5	1666.66	1250.00	—
G6	555.55	420.00	—
G7	555.55	420.00	0.244
G8	555.55	420.22	0.244
G9	1666.66	1250.00	0.250

②发电机功率控制

发电机 G1、G2 和 G3 属于稳定机群, 发电机 G4、G7、G8 和 G9 属于不稳定机群。此处假定 G1 和 G2 保持在额定条件, 它们的输出保持在额定输

出不变，则发电功率控制将在发电机 G3—G9 之间完成。下文给出发电机功率控制的相关计算。表 5.3 给出按本文等式 5.1 定义的发电裕度。

母线 16 上接有两台发电机—G5、G6，需求出最严重事故下的 CCT 与发电机 G5 和 G6 的相互关系。 $\Delta P_{es} : \Delta P_{e6}$ 的值是由发电容量的比值给出的，即：

$$\Delta P_{es} : \Delta P_{e6} = C_5 : C_6$$

其它发电机由本文所述的方法求出。

为了验证上节所述的线性关系，本文作了大量计算，求出发生最严重故障 5 时故障母线上的发电机输出与 CCT 的关系。图 5.3 给出了 P_{es} 与 CCT 的关系。由图 5.3 的结果可知凡。与 CCT 的关系几乎是线性的。利用这个线性关系，可以估计出临界时间为 0.25 时的 P_{es} 。步骤如下：首先计算初始条件和其它任意凡。下的 CCTo 其次在 CCT 与凡。坐标平面上求得过所求得的两点的直线。最后，找出该直线与预先给定的切除时间(这里 $t=0.2s$)的交点。

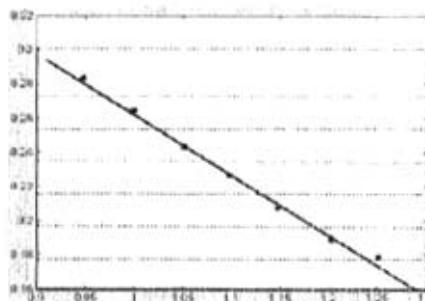


图 5.3 CCT 与 P_{es} 的关系

Fig 5.3 The relationship between CCT and P_{es}

本文计算了初始条件 ($P_{es}=1.25$ [p.u.]) 和 P_{es} 了 0.1 ($P_{es}=1.15$ [p.u.]) 时 CCT。按上述步骤可求得当 CCT=0.2s 时， $P_{es} 1.18$ [p.u.]。据此所有发电机的输出变化量可按等式 5.2、5.3 求得：

$$\Delta P_{es} = 1.18 - 1.25 = -0.07$$
 [p.u.]

$$\Delta P_{e6} = \Delta P_{es} \times \frac{C_6}{C_5} = -0.07 \times \frac{555.55}{1666.66} = -0.023[\text{p.u.}]$$

$$P_{e6} = 0.42 - 0.023 = -0.397[\text{p.u.}]$$

$$\Delta P_{ef} = \Delta P_{e5} + \Delta P_{e6} = -0.093[\text{p.u.}]$$

$$\sum_{k \in B} \frac{1}{\Delta C_k} = \frac{1}{\Delta C_4} + \frac{1}{\Delta C_7} + \frac{1}{\Delta C_8} + \frac{1}{\Delta C_9} = 16.29$$

$$\Delta P_{e4} = \frac{1/\Delta C_4}{\sum_{k \in B} 1/\Delta C_k} \times \Delta P_{ef} = -0.024[\text{p.u.}]$$

$$\text{推出, } P_{e4} = 0.42 + \Delta P_{e4} = 0.396[\text{p.u.}]$$

类似, P_{e7} 、 P_{e8} 可以求得:

$$\Delta P_{e9} = \frac{1/\Delta C_9}{\sum_{k \in B} 1/\Delta C_k} \times \Delta P_{ef} = -0.023[\text{p.u.}]$$

$$\text{则 } P_{e9} = 1.25 + \Delta P_{e9} = 1.227[\text{p.u.}]$$

$$\text{所以, 全部减少量} = \Delta P_{ef} + \Delta P_{e4} + \Delta P_{e7} + \Delta P_{e8} + \Delta P_{e9} = -0.186[\text{p.u.}]$$

$$\Delta P_{e3} = \frac{\Delta C_3}{\sum_{k \in B} \Delta C_k} \times \text{全部减少量} = 0.186[\text{p.u.}]$$

$$\text{则 } P_{e3} = 4.344 + \Delta P_{e3} = 4.530[\text{p.u.}]$$

但是, 这里由于发电机 G3 所连母线是平衡节点, P_{e3} 应该由潮流计算结果确定, 潮流计算可得 $P_{es} = 4.528[\text{p.u.}]$ 。表 5.4 给出了所有发电机的输出变化量。

功率控制初步结束后, 重新进行一次事故筛选, 其结果见表 5.5。由表可以看出所有的事故情形都是稳定的。

表 5.4 功率变化(标么值)

Tables.4 Generation changes

发电机	初始输出 (p.u.)	控制后的输出 (p.u.)	变化量 (p.u.)
G3	4.344	4.528	0.184
G4	0.42	0.396	-0.024
G5	1.25	1.18	-0.07
G6	0.42	0.397	-0.023
G7	0.42	0.396	-0.024
G8	0.42	0.396	-0.024
G9	1.25	1.227	-0.023

表 5.5 事故筛选结果(控制后)

Tables.5 Screening results(after rescheduling)

故障排序	故障点	支路	CCT (s)
1	5	16, 15	0.20
2	6	16, 17	0.21
3	11	20, 13	0.21
4	10	20, 19	0.22
5	4	15, 16	0.25
6	2	15, 14	0.25
7	3	15, 19	0.26
8	9	19, 20	0.28
9	8	19, 15	0.28
10	7	19, 18	0.28
11	1	12, 13	0.30

5.4 小结

发电机功率预防控制(发电机的动态安全调度)是暂态稳定预防控制中的一部分。而随着电力系统和电力市场的发展, 实现暂稳预防控制特别是在线控制是必须的。为此, 本文提出了一种利用临界切除时间的暂态稳定预防控制中发电机功率控制的方法。本文的功率控制方法利用了临界切除时间 CCT 和最临界机输出的线性关系。在求得最临界机的功率变化量以

后,用本章所提出的方法决定其它发电机相应的输出功率的变化量。仿真结果证明了所提出的方法的有效性。此外,在进行事故筛选时,本文提出将各种事故情形按安全、不安全和介乎二者之间的原则分为三类,从而有利于预防控制的完成和实施,避免了简单地划分为安全和不安全时造成的重复计算,提高了计算的速度,因而更有可能满足在线安全控制所要求的快速性。当然本章所作的研究工作主要是如何快速地确定发电机所需进行的预防控制的功率改变量。至于其它如在线监视量的获得等等本文没有涉及。当然,发电机的功率预防控制必须要与其它在线评估措施协调。当然本文所提出的方法的计算结果也可作为运行部门的参考。

第6章 结论

本文在采用 Normal Form 变换方法分析电力系统的暂态稳定性方面进行了深入的研究, 通过 Normal Form 变换, 可以得到原系统在 Z 空间和 X 空间中的局部稳定边界, 通过判断持续故障轨迹何时和稳定边界相交能够求得故障临界切除时间, 根据这个临界切除时间与实际切除时间的比较就可以判断系统在故障切除后是否能稳定运行, 同时, 还可以得到时间裕度, 用时间作为系统稳定裕度的度量比用能量度量更加直观, 运行人员更容易接受。

本文的主要结论如下:

1. 在电力系统中采用 Normal Form 变换方法, 可以将描述原非线性系统的微分方程组变换为 Z 空间中的线性系统微分方程组, 所以各变量(如相角、角速度)可解析表达, 再利用 Normal Form 反变换则可以得到原系统空间中各变量的解析表达式, 它是关于 z_1, z_2, \dots, z_n 的代数方程组。
2. 通过 Normal Form 变换, 可以将原系统主导不稳定平衡点附近的稳定边界映射到 Z 空间, 并从理论上分析了该空间中的局部稳定边界是一超平面, 同时, 从几何上也给出了其直观的表示。对该平面进行分析可知, 这个超平面可用 $z_i=0$ 表示(其中 i 对应于唯一的正特征值), 它的原象就是原系统主导不稳定平衡点附近的稳定边界。
3. 由于稳定边界对应于 $z_i=0$, 并且又得到了原系统空间中各变量关于 z_1, z_2, \dots, z_n 的解析表达式, 所以令各解析表达式中的 $z_i=0$, 则原系统空间中的稳定边界可求。在单机无穷大系统中, 通过比较这个稳定边界和暂态能量函数法所求的稳定边界, 可知该方法是很有效的。
4. 通过分析不采用 Normal Form 变换方法而直接在原系统中进行线性化所得到的稳定边界可知, 在主导不稳定平衡点附近, 采用 Normal Form 变换方法确定的稳定边界要比直接线性化方法所确定的更接近于实际的稳定边界, 二者之间的实质差别在于后者实际上是前者的一阶项, 即是其线性部分, 而前者还包括了二阶项, 所以在对稳定边界的模拟方面, 采用 Normal Form 变换的方法要优于直接线性化的方法。

5. 提出了通过判断持续故障轨迹何时和稳定边界相交来求得故障临界切除时间的方法，并从理论上及多个算例说明了该方法的可行性和有效性。在求得系统的故障临界切除时间后，通过和系统的实际切除时间作比较就可以判断系统在故障切除后是否能稳定运行。同时，还可以计算时间裕度，用时间作为系统稳定裕度的度量比用能量度量更加直观。

6. 通过判断持续故障轨迹何时和稳定边界相交来求临界切除时间的方法，在原系统空间和 Z 空间中都可以进行计算，但其计算精度随故障类型不同而不同。在 Z 空间中求严重故障(如三相短路)时的临界切除时间与数值仿真法较接近，而在原系统空间中求轻微故障(如单相短路)时的临界切除时间与数值仿真法较接近。因此将以上两种情况结合起来对各种故障类型求临界切除时间都可以获得很好的精度。

由于 Normal Form 变换方法是在二阶近似系统下进行的变换，并且文中所采用的算例是单机无穷大系统，所以 Normal Form 变换方法带来的误差理论分析以及在多机系统中的应用是本文今后需要继续研究的课题。

参考文献

- [1] IEEE Committee Report. Proposed terms and definition for power system stability[J]. IEEE Trans on PAS. 1982, (2): 856-867
- [2] Prabha Kundur. Power system stability and control[M]. New York: Mc Gram-Hill Inc. 1994
- [3] D.Xia, G.Heydt. On line transient stability decomposition- aggregation and higher order derivatives[J]. IEEE Trans on PAS. 1983, (7): 847-856
- [4] 郭志忠,柳焯. 快速 Taylor 级数法暂态稳定计算[J]. 中国电机工程学报. 1991, 11(3): 321-328
- [5] IEEE Committee Report. Parallel Processing in Power System Computation[J]. IEEE Trans on PWRS. 1992, 7(2): 567-573
- [6] 汪芳宗,陈德树,何仰赞. 大规模电力系统暂态稳定性实时仿真及快速判断[J]. 中国电机工程学报. 1993, 13(6): 341-347
- [7] 郭志忠,朱文东,柳焯等. 电力系统暂态稳定的快速时域仿真判定法[J]. 电工技术学报. 1994, (8): 145-150
- [8] T.Athay. A practical method for the direct analysis of transient stability[J]. IEEE Trans on PAS. 1979, (2): 280-285
- [9] H.F.Williams, et al. Feasibility of lyapunov function for the stability analysis of electric power system having up to 60 generators[J]. IEEE Trans on PAS. 1972, (4): 678-686
- [10] Kakimoto, N.M.hayashi. Transient stability analysis of multi-machine power system by lyapunov's direct method[C]. Proceeding of 20th IEEE Conference on Decision and Control, 1981, 1465-1471
- [11] 刘笙, 汪静. 电力系统暂态稳定的能量函数分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社. 1996
- [12] H.D.Chiang, F.F.Wu, P.P.Varaiya. A BCU method for direct analysis of power system transient stability[J]. IEEE Trans on PES. 1991, (5): 346-353
- [13] 李志民. 基于详细模型的暂态能量函数法的研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文. 1994

- [14] 姚良忠. 电力系统综合直接法暂态稳定分析及暂稳极限算法研究[D]. 清华大学博士论文. 1993
- [15] Y.T.H.Xue, Van Cutsem. A simple direct method for the fast transient stability assessment of large power system[J]. IEEE Trans on PWRS. 1988, 4(2): 232-240
- [16] 薛禹胜. EEAC 和 FASTEST[J]. 电力系统自动化. 1998, 22(9): 571-575
- [17] 夏成军, 周良松等. 基于 Epsilon 分解的发电机同调识别新方法[J]. 电力系统自动化. 2000, 24(2): 381-385
- [18] N.Gacic, A.I.Zecevic, D.D.Siljak. Coherency recognition using epsilon decomposition[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1998, 13(2): 189-196
- [19] M.Amano, A.I.Zecevic, D.D.Siljak. An improved block-parallel newton method via epsilon decompositions for load-flow calculations[J]. IEEE Trans on Power Systems. 1998, 11(4): 367-378
- [20] A.A.Found. Transiet stability program output analysis[J]. IEEE Trans on PWRS. 1980, 1(1): 12-21
- [21] 穆钢. 基于暂态能量的轨迹分析方法及其在电力系统暂态稳定分析中的应用[D]. 清华大学博士论文. 1991
- [22] F.F.Wu, Y.K.Tsai. Probabilistic dynamic security assessment of power system[J]. IEEE Trans on Circuit Syst. 1983, 30(4): 412-419
- [23] 李颖晖, 张保会. 运用非线性系统理论确定电力系统暂态稳定域的一种新方法[J]. 中国电机工程学报. 2000, 20(1): 34-40
- [24] F.F.Wu, Y.K.Tsai, Y.X.Yu. Probabilistic steady-state and dynamic security assessment[J]. IEEE Trans on PWRS. 1988, 3(3): 489-495
- [25] 余贻鑫, 栾文鹏. 电力系统动态安全域的研究[J]. 电力系统自动化. 1990, 2(1): 37-42
- [26] 冯飞, 余贻鑫. 电力系统动态安全域的微分拓扑特性[J]. 电力系统及其自动化学报. 1991, 3(4): 187-193
- [27] 冯飞, 余贻鑫. 电力系统注入空间的动态安全域[J]. 中国电机工程学报. 1993, 13(3): 231-238
- [28] H.D.Chiang, M.Hirsch, F.F.Wu. Stability region of nonlinear autonomous dynamic systems[J]. IEEE Trans on AC. 1988, 33(1): 78-86
- [29] H.D.Chiang, F.F.Wu, P.P.Varoiya. Foundations of direct method for power system transient stability analysis[J]. IEEE Trans on CS. 1987, 34(2): 143-151

- [30] H.D.Chiang. Analytical results on direct methods for power system transient stability analysis[J]. IEEE Trans on PWRS. 1991, 43(3): 376-384
- [31] S.Saha, A.A.Fouad, W.H.Kliemann, V.Vittal. Stability boundary approximation of a power system using the real normal form of vector fields[J]. IEEE Trans on Power System. 1997, 12(2): 256-268
- [32] Chih-Ming Lin, V.Vittal, W.Kliemann, A.A.Fouad. Investigation of modal interaction and its effects on control performance in stressed power systems using normal forms of vector fields[J]. IEEE Trans on Power System. 1996, 11(2): 214-221
- [33] J.Thapar, V.Vittal, W.Kliemann, A.A.Fouad. Application of the normal form vector fields to predict interactea seperation in power system[J]. IEEE Trans on Power System. 1997, 5(2): 254-261
- [34] S.K.Starrett, A.A.Fouad. Nonlinear measures of mode-machine partition[J]. IEEE Trans on Power System. 1998, 13(2): 289-294
- [35] 李颖晖,张保会. 基于稳定流形变换的电力系统暂态稳定性计算[J]. 西安交通大学学报. 2000, 34(3): 290-195
- [36] 李颖晖,张保会. 运用非线性系统理论确定电力系统暂态稳定域的应用[J]. 中国电机工程学报. 2000, 20(2): 128-134
- [37] 李颖晖,张保会. 对 Normal Form 变换的多值性的分析和研究[J]. 电力系统及自动化. 2000, 24(6): 276-281
- [38] 李颖晖,张保会,李勤. 电力系统稳定边界的研究[J]. 中国电机工程学报. 2000, 22(3): 367-372
- [39] Ng W Y.Generalized generation distribution factors for Power system security evaluation[J]. IEEE Trans.on power Apparatus and Systems.1951.100(3):1001-1005
- [40] Chang YC, Yang WT, Liu CC. ImProvement on GGDF for power system security evaluation[C]. IEE Proceedings Part C.1994.141(2): 85-88
- [41] CrisanO , Liu M.Voltage collapse Prediction using an improved sensitivity approach[J]. Electric Power System Research.1994.28: 181-190
- [42] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报.1999.19(4): 9-13
- [43] A. N. Michel. Recent trends in the stability analysis of hybrid dynamical systems[J].IEEE Trans. on Circuit and Systems 1.1999.45(45): 120-134

- [44] P .J.Antsak. Special issue on hybrid control systems[J]. IEEE Trans.on Automatic Control.1999. 43(4): 365-369
- [45] L .G.Perez, Flechsig A.J. Modeling the protective system for power system dynamic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 1994.9(4): 1963-1973
- [46] M. Branicky, V.S.Borkar. A unified framework for hybrid control: model and optimal control theory[J].IEEE Transactions on Automatic Control.1998.43(1): 31-45
- [47] J .H.T Jilor. Rigorous handling of state events[C]. IEEE conf. Control Applications.Albany, NY SePt.1995: 156-161.
- [48] S.M.Benluch, J.H. Chow.A trajectory sensitivity method for the identification of nonlinear excitation system models[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion. 1993.Vol.8: 159-164
- [49] L.A.Hiskens, M.A.Pai. Sensitivity analysis of power systems trajectories: recent results[C]. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems.1998.vol.3: 439-443
- [50] W.Erdman, R.G.Hoft.A trajectory sensitivity approach to parameter disturbance problems in indirect field oriented drive systems[C].Conference Record of the IEEE Trans. on Industry Applications Society Annual Meeting.1989.Vol.1: 617-631
- [51] U.T. Megretski, Kao Jonsson, Chung Yao. Estimation of sensitivity of periodic trajectories with respect to structured uncertainty[J]. IEEE American Control Conference.2000. 5: 3101-3105
- [52] P .Sannuti, J.Cruz, Lee Imsong, A.Bradt.A note on trajectory sensitivity of optimal control systems[J]. IEEE Trans.on Automatic Control.1968.13(1): 111-113
- [53] E .Kreindler. Formulation of the minimum trajectory sensitivity problem[J]. IEEE Trans.on Automatic Control. 1969.14(2): 206-207
- [54] P.Byrne, M.O.Burke. Optimization with trajectory sensitivity considerations[J]. IEEE Transactions on Automatic Control.1976.21(2): 282-283
- [55] R .Subbayan, V Sarilla, M.Vaithilingam.Trajecoty sensitivity modification in optimal linear systems[J].IEEE Trans.on Automatic Control.1977.22(4): 657-659
- [56] L.Kllalifa, A. Hanafy.A. Note on trajectory sensitivity reduction using a three-term controller[J]. IEEE Trans.on Automatic Control. 1984.29(8): 739-740
- [57] C. Vellie.Comments and corrections to "Trajectory sensitivity reduction using a

- three-term controller”[J]. IEEE Trans. on Automatic Control. 1986. 31(1): 93-94
- [58] J .Sanchez Gasca , C.J.Bridenbaugh , C.E.J.Bowler , J.S.Edmonds. Trajectory sensitivity based identification of synchronous generator and excitation system Parameters[J]. IEEE Trans. on Power Systems. 1988. 3(4): 1814-1822
- [59] S. M. Benchluch, J.H. Chow. A trajectory sensitivity method for the identification of nonlinear excitation system models[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion. 1993. 8(2): 159-164
- [60] M. Branicky, V. Borkar, K. Mittle. A unified network for hybrid control: model and optimal control theory[J]. IEEE Trans. on Automatic Control. 1998. 43(1): 3-15
- [61] L .A.Hiskens, M.Akke. Analysis of nordel power grid disturbance of january, 1997, using trajectory sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 1999. 14(3): 987-994
- [62] 薛禹胜. 2000 年国际大电网会议系列报道—关于系统分析技术的讨论[J]. 电力系统自动化. 2000, 26(10): 6-10
- [63] 郭国川. 电力市场环境下的电网安全稳定-第 39 届国际大电网会议热点问题评价(续)[J]. 中国电力. 2003. 20(1): 43 — 47
- [64] 杨新林, 孙元章. 电力系统动态安全调度新算法[J]. 电力系统自动化. 2002. 25(2): 1-4
- [65] 丘区家驹, 韩桢祥, 薛禹胜. 2000 年国际大电网会议系列报道—电力系统的运行和控制[J]. 电力系统自动化. 2001, 25(7): 1-4
- [66] 袁季修. 电力系统安全稳定控制的规划和应用[J]. 中国电力. 1999. 32(5): 29-32
- [67] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化. 2002. 26(4): 1-5
- [68] 潘志宏, 张伯明, 张毅威. 能量管理系统中在线动态安全评估的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版). 1999. 39(3): 45-45
- [69] Kuo DH, Bose A.A. Generation rescheduling method to increase the dynamic security of power system[J]. IEEE Trans. on Power Systems. 1995. 10(1): 68-76
- [70] Yi.Gu, Yiwei Zhang, et al. A novel approach for on-line transient stability assessment[J]. IEEE PWRS. 2002. 34(5): 281-285
- [71] Yoshinori Kato, Shinichi Iwamoto. Transient stability preventive control for stable operating condition with desired CCT[J]. IEEE Trans. Power Systems. 2002. 17(4): 1154-1161

- [72] V. Vitta, E.R.Zhou, C.Hwang, A.A.Fouad. Derivation of stability limits using analytical sensitivity of the transient energy margin[J]. IEEE Trans.on Power Systems. 1989. 4(4): 1363-1372
- [73] 郑超, 穆刚, 盛灿辉.运用轨迹分析方法计算临界机临界暂稳功率极限的研究[J].东北电力学院学报.2002.22(3): 1-4
- [74] 姚良忠, 倪以信, 张伯明等.基于人工神经网络的电力系统暂稳极限功率快速确定[J].清华大学学报.1994.34(1):15-22
- [75] 薛禹胜.电力系统稳定性的在线评测[M].1998 中国科学技术前沿(中国工程院版).北京.高等教育出版社.1999.
- [76] S .Yamashiro. On-line security-economy preventive control of power systems by pattern recognition[J]. IEEE Trans.on Power Systems. 1986.1(3): 1543-1547
- [77] V Miranda, Fidalgo J N, Pecas LoPesa J B. Real time preventive actions for transient stability enhancement with a hybrid neural network-optimization approach[J]. IEEE Trans.on Power Systems.1995.10(2): 1029-1035
- [78] Fouad A, Tollig J. Stability constrained optimal rescheduling of generation[J]. IEEE Trans.on PWRS. 1993.8(1): 789-795
- [79] Xue.Y, Th.Van Cutsem, M.Ribbens-Pavella. Rest-time analytic sensitivity method for transient security assessment and Preventive control[C]. IEE Proc.134, 1988. Part C: 107-117
- [80] Li Wenping, njan Bose. A coherency based rescheduling method for dynamic security[J]. IEEE Trans.on Power Systems. 1998.13(3): 1024-1029
- [81] A. A. Fouad, Tong Jianzhong. Stability constrained optimal rescheduling of generation[J].IEEE Trans.on Power Systems. 1993.8(1): 681-685
- [82] Y. Xue, et al. Extended equal area criterion, justifications, generalization, applications[J]. IEEE Trans.on Power Systems-4.1989, 44-52
- [83] Yoshinori Katoh, Hiroshi Takala, Shinichi Iwamoto, Transient stability preventive control using kinetic energy and critical clearing time[C]. Power Conf 2000 Proceedings Vol.I.Dec. 2000:151-156

致 谢

衷心感谢导师于锡纯副教授、张化光教授、冯健副教授及张忠林高级工程师在研究生阶段给予的帮助和精心指导。导师渊博的知识及考虑问题的深度和广度、实事求是的治学作风和为人师表的学者风范使本人受益非浅，对本人今后的学习和生活有着重要的影响。在论文完成之际，向各位老师致以深深的谢意！