

ABSTRACT

Power transfer capability provides valuable measurement to the security and reliability of interconnected power systems. Along with the developments of power market, transfer capability possesses signal function of market. Thus how to calculate the transfer capability quickly and precisely and how to satisfy the demand of power load furthest become a challenging task under the precondition of security and reliability.

This paper presents a computational method to determine the available transfer capability constrained by voltage stability limit. Firstly it summarizes the continuation power flow method which most widely applied in power system. It concretely analyzes the method of partly parameterized and radian parameterized. It introduces an algorithm which combines continuation method with optimization method in considering about generator power constraint.

This paper particularly demonstrates the elements of computing the power transmission limit through constraint exchange points, evaluates these points' pattern by use of immediate stability analysis.

This paper aims at the problem of traditional continuation power flow whose computing time is too long in considering about generator reactive power limit, presents a new algorithm, establishes the model to calculate the maximum transfer capability, and deduces the formula and compile program. The method puts constraint conditions into the approach directly, computes constraint exchange point, and then evaluates reliability of these points. So it has good convergence character and costs less time. At last this paper validates the method through three IEEE examples and certain practical example. Computing time of the method has greatly decreased in contrast to traditional continuation power flow method, which confirms its superiority and practicality.

KEY WORDS: Transfer capability, Voltage stability, Continuation power flow, Constraint exchange point

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：李永峰 签字日期：2006年3月1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：李永峰 导师签名：张庆远
签字日期：2006年3月1日 签字日期：2006年2月28日

第一章 绪论

1.1 引言

现代电力系统逐渐向大型化、互联化、市场化以及能源供应中心与负荷中心分离的方向发展,由于环境保护、地理环境等多方面的限制,需要有效利用现有输电设备提高系统的输电能力,最大限度降低运营成本,实现更大范围内能源优化配置。但随着传输功率的增大,互联电网抗扰动的能力却在逐渐减小,近几年来大的停电事故屡屡发生,造成巨大的经济损失,究其原因多与系统的稳定性有关,电力系统的稳定性作为一个同人民生活和经济发展息息相关的话题已经受到了重视。

电力系统稳定一般按电力系统抗干扰的能力分为静态和暂态两大类,静态稳定性又包括功角稳定和电压稳定,本文所涉及的是电力系统的静态电压稳定。

电压稳定是电力系统稳定的重要组成部分,系统的输电能力指标因能较好地反映电力系统的电压稳定水平而受到电力界的广泛重视,它的确定不仅能指导系统调度人员的操作,保证系统安全可靠运行,而且随着电力行业逐步市场化,输电能力也具有市场信号的作用,能为各参与者在电力市场下的商业行为提供参考。这样在满足系统安全性与可靠性的前提下如何确定互联电力系统区域间的功率传输能力,尽可能地保证各区域间用电负荷的需求成为电力系统界亟待解决的课题。

1.1.1 输电能力的定义及相关因素

电力系统实际运行中经常使用的是一次故障下的总输电能力FCTTC (First Contingency Total Transfer capability),根据北美电力系统可靠性委员会(NERC)在上个世纪九十年代的定义^[1]:一系统两区域间的输电能力(FCTTC),是指在满足下述约束条件下,通过两区域间的所有输电回路,从一个区域向另一个区域可能输送的最大功率。

- (1)无故障发生的情况下,系统中所有设备(包括线路)的负荷及电压水平在其额定范围内。
- (2)在系统中单一元件(输电线、变压器或发电机等等)停运的故障条件下,系统应能够吸收动态功率振荡,维持系统的稳定性。

(3)当(2)中描述的事故发生且系统功率振荡平息后,在调度员进行故障相关的系统运行方式调整之前,所有设备(包括输电线)的功率及电压水平应在给定的紧急事故条件下的额定范围内。

FCTTC实际就是通常所说的满足N-1故障校验的输电能力,它的求解不仅需要考虑系统电压和线路负荷等静态安全性约束条件的影响,而且要考虑稳定性这样的动态约束条件;不仅要考虑正常运行方式下系统的运行,而且要考虑各种故障情况后系统的运行。由于计算系统输电能力通常是通过计算机模拟特定的运行条件下互联电力系统的运行情况获得的,在计算过程中必须考虑如下因素:

☆用户负荷特性:在进行计算时,基态负荷水平必须与被研究的用户负荷水平相适应,必须能代表各个时间段的负荷特性;

☆发电机调度方式:在计算时必须按照系统实际情况来模拟工作机组与备用机组的出力与调度方式,在必要时还应该考虑发电机的能力曲线问题;

☆系统网络结构:在计算中必须准确地模拟出基态情况下互联系统网络的各种特性,其中包括对系统内任意设备退出运行以及对改变运行方式时系统相应变化的模拟;

☆预约输电服务:在计算中必须考虑已经由交易双方确认的预约输电服务对输电能力的影响;

☆系统故障:在计算中必须根据实际系统需要对相应的故障进行分析,找出对输电能力影响最大的故障,在某些情况下还应该适当考虑多重故障发生时系统的状况。

电力市场的发展又带来了可用输电能力ATC (Available Transfer Capability) 的概念^{[2]-[3]},它是用来衡量互联电力网络如何运行以满足商业性输电服务要求的指标,ATC其实是一个技术性和商业性的综合体。可用输电能力可表示为TTC-TRM-ETC,其中:TTC(Total Transfer Capability)是最大输电能力TRM(Transfer Reliability Margin)是输电可靠性裕度;ETC(Existing Transmission Commitments)是现存输电协议量,它包括零售用户服务,以及容量效益裕度CBM(Capability Benefit Margin)。TTC是在某一可靠方式下互联输电网络上传输的功率量,同时满足一组指定的故障前后的系统条件。TRM定义为必要的输电网的输电能力,以确保互联输电网络在系统条件不确定的合理范围内是安全的。CBM定义为负荷供应单位储备的输电网输电能力的数量,以确保从互联系统中获得出力,满足发电可靠性要求。

1.1.2 输电能力研究的意义

输电能力研究的重要性表现在：

1. 输电能力研究可为电力网络规划提供辅助测评手段。输电能力的大小直接反映了电网的安全性、可靠性，以及互联电网的联接强度和结构的优劣。通过对输电能力的准确求解，可以为电网规划设计部门及审批部门提供量化的辅助性评估标准。
2. 输电能力的实时求解对于电力系统运行调度部门具有重要意义。通过计算，可以及时掌握系统目前运行情况，合理调度各区域间的资源，合理利用现有设备的传输能力，避免危及全网的恶性事故发生。
3. 在电力市场环境下，系统输电能力的大小是电力交易双方需要确切掌握的基本数据。它将影响到发电服务、输电服务分析等环节。输电能力的确定对于约束电力交易行为，保障公共电网安全具有积极作用。

1.1.3 输电能力的研究现状

输电能力研究已有30多年的历史，早在70年代国际学者就开始研究输电能力的计算方法。早期研究主要集中于静态安全约束如线路过负荷，电压越限等，运用的方法主要有概率法^[4]，线性规划法^[5]等。近年来大电网稳定破坏事故的频频发生，特别是几次重大的电压稳定破坏事故的出现，使人们不得不重新审视输电能力的定义。根据考虑的约束类型不同，输电能力研究可分为考虑功角稳定与考虑电压稳定两种情况，后者又可分为暂态电压稳定与静态电压稳定。本文所涉及的是考虑静态电压稳定性约束的输电能力的研究。

ATC计算方法大体上可以分为确定性的求解方法和基于概率的求解方法两大类。确定性的方法主要包括线性分布因子法(LDF: Linear Distribution Factor)、重复潮流法(RPF: Repeated Power Flow)、连续潮流法(CPF: Continuation Power Flow)、最优潮流法(OPF: Optimal Power Flow)、灵敏度分析法等。另外不少文献采用概率性的方法计算ATC时，主要基于很多电力系统参数所具有的各种随机特性，是期望在概率框架下能得到与实际情况更为接近的解。事实上，一方面这些随机不确定因素在TRM中已被计及，另一方面在求解ATC时基于概率的方法与确定性方法的基本原则是一致的，因此这里只评述确定性的求解方法。

1. 线性分布因子法^{[6]-[7]}也叫直流灵敏度系数法，是基于直流潮流分析实际网络响

应系数的方法，一般用到多种线性分布因子。直流潮流假设节点电压幅值为常数，计及支路电抗而忽略支路电阻，因而不存在线损。直流潮流模型是线性的，不需要迭代，因而计算速度快，目前在电力系统各个领域已得到广泛的应用。线性分布因子法能很方便地考虑“N-1”静态安全约束和支路过负荷约束。在计算过程中不需迭代，其求解速度快，可以满足在线应用。但它无法计及电压约束和其它稳定约束，并且由于忽略电压和无功因素，在电网结构不紧密、无功支持不充足的系统中将存在较大误差。

2. 重复潮流法^{[6]-[9]}又叫常规潮流法。这种方法基于常规交流潮流，计算中考虑节点电压限值约束，支路过负荷约束以及其它可能的稳定约束。其要点是逐渐增加负荷侧的负荷，同时相应增加发电侧的出力，直到某一约束生效为止，此时通过所研究断面的有功潮流之和即为最大输电能力。重复潮流计算ATC的方法原理简单，可以计及系统的电压和无功对ATC的影响，计算结果能较好地反映实际运行状况，但需要重复计算交流潮流，计算时间长，不适合在线应用。
3. 作为一种求解非线性代数方程的数值方法，连续潮流法^{[10]-[14]}在上个世纪90年代引起人们关注，是因为该方法在电压稳定性研究方面有其独特的优越性。CPF广泛应用于计算静态电压稳定的PV曲线中的极限功率点。由于牛顿法在电压稳定极限点附近因雅可比矩阵奇异，引起潮流不收敛。而CPF法可从当前潮流解出发，逐步增加输送端母线功率，通过迭代求解，沿PV曲线准确得到鞍结点相应的发电功率，因而可以方便地用来计算静态电压稳定约束下的ATC。与线性分布因子法相比，该方法的优点在于能考虑到系统非线性以及无功的影响和静态电压稳定性。它可以避免重复潮流方法在电压稳定极限附近的病态问题。但是，CPF方法对指定的发电机群和负荷群采用了不变的功率注入变化方向向量，不考虑系统无功和电压的分布优化，这可能会使ATC的计算结果略为保守；CPF方法由于包括了重复预测和校正的过程，计算时间长，无法满足在线计算要求；此外难以考虑“N-1”静态安全约束，步长也较难合理确定。
4. 最优潮流法^{[15]-[21]}是将输电容量的计算描述为一个非线性优化问题。在传统电力工业运行模式下，OPF技术被用于处理实时或准实时的电力系统运行优化问题。而在电力市场环境下，市场机制激励竞争，市场主体追求利益最大化，这就增强了调度和运行状态的不确定性。OPF作为经典经济调度理论的发展与延伸，可将经济性与安全性近乎完美地结合在一起，已成为一种不可缺少的网络分析和优化工具。最优潮流方法以可用输电容量最大化为目标函数，将潮流方程作为等式约束，把支路过负载约束、电压约束和各种稳定约束等作为不等式约束，从而把ATC的计算问题转化为一个纯粹的非线性规划的数学问题。因而

可以采用各种优化算法，如二次规划法、内点法、人工神经网络法和Benders分解法等。基于最优潮流的ATC计算方法与连续潮流法相比，对约束条件有更强的处理能力，理论上可以处理各种约束，还可以进行有功和无功优化，计算结果更准确。但这类方法有下述问题：很难考虑系统稳定性这样的动态约束条件；所获得的最优运行点是一个理想的结果，实际上难以达到；需要的计算时间长，难以满足在线要求；目前尚难应用于大规模电力系统。

5. 由以上分析可知，线性分布因子法计算速度快，但精度不高；重复潮流法、连续潮流法和最优潮流法计算时间长，难以在线应用，而且重复潮流法和连续潮流法计算结果往往偏保守。灵敏度分析法^[22]就是在这样的背景下被提出来的，其计算速度快，满足在线计算要求，同时能保证一定的精度。但是需要指出，它不是一个独立的ATC计算方法，它需要以某种ATC计算结果为基础。基于交流潮流的灵敏度分析法的最大优点是当电力系统中某些运行参数发生变化后，它可以快速计算出其对ATC的影响，而不需要重新进行潮流计算，从而在系统运行状态改变后，获得特定断面的ATC。对于一组给定的系统参数，可以利用重复潮流法、连续潮流法或最优潮流法计算某一断面的ATC。基于一阶灵敏度分析法计算ATC速度快，满足在线应用的要求。不过，对于给定的系统运行状态和参数，需要预先计算较多的灵敏度系数，当运行点发生较大变化后，这些灵敏度系数需要重新计算。在系统运行情况变化不大时，求得的ATC还是比较准确的，但当系统运行情况发生较大变化时，如支路或发电机停运，可能会存在较大误差。但总的说来，灵敏度分析法与前述某种方法，如OPF法，结合在一起使用是一种非常实用的综合在线计算方法。

1.2 本文的工作及结构

本文所做的工作有：

1. 对系统输电能力的基本概念及基本的计算方法进行了描述。
2. 总结了电力系统领域中应用最广泛的几种连续性潮流计算方法，对局部参数化，弧长参数化方法作了具体分析，针对发电机有功限制，介绍了一种将优化方法与连续性潮流算法相结合的确确定发电机有功出力算法。
3. 详细阐述了通过约束变换点求取系统功率极限的基本原理，并对其类型进行静态分析判断，建立了用此方法求解系统最大输电能力的数学模型并进行了公式推导和程序实现。

4. 针对考虑发电机无功出力时，传统算法计算时间过长，提出利用约束变换点求取功率输出极限的改进连续潮流算法，并用IEEE三个实例以及某实际算例对其验证，它的计算时间比传统连续潮流算法大大减少，证实了该方法的可行性和实用性。

本文的主要结构为：

本文第二章介绍了连续性潮流，包括连续性潮流的基本原理与算法流程，这是输电能力计算的基本工具。第三章对发电机有功出力方式做了优化配置，介绍了一种将优化方法与连续性潮流算法相结合的确切发电机有功出力的算法。第四章首先叙述了通过约束变换点求取系统功率极限的基本原理，然后建立了用此方法求解系统最大输电能力的数学模型并通过了程序实现，最后用实际算例证实该方法的有效性。第五章是全文总结。

第二章 基于连续性潮流方法的输电能力计算

2.1 系统输电能力计算模型

含单一参数的电力系统代数微分方程式可用式(2-1)表示:

$$\begin{aligned} G(X, Y, \lambda) &= 0 \\ F(X, Y, \lambda) &= \dot{X} \end{aligned} \quad (2-1)$$

其中, $X \in R^N$ 表示微分状态分量, $Y \in R^M$ 表示代数状态分量, $\lambda \in R^1$ 是一个输电能力参数。

当满足以下两个基本假设条件后, 式(2-1)所对应的电力系统电压稳定性问题可以近似用系统的静态模型来表述, 即方程(2-1)中的微分方程 $F(X, Y, \lambda) = \dot{X}$ 中 $\dot{X} \approx 0$, 此时的系统输电能力问题只需要考虑潮流方程鞍结分岔问题。

假设a. 系统的阻尼作用足以消除Hopf^[23]分岔的出现;

假设b. 忽略大扰动对系统稳定的影响, 即认为系统是暂态稳定的(包括暂态功角稳定与暂态电压稳定)。

为求解式(2-1)中所描述系统的鞍结分岔问题, 可将其用式(2-2)的参量形式来描述:

$$F(X, \lambda) = G(X) + \lambda D = 0 \quad (2-2)$$

其中:

$G(X) = \begin{bmatrix} P(X) \\ Q(X) \end{bmatrix}$ 表示节点流出的有功和无功功率, 当 $G(X)=0$ 时其实就是常规潮流

方程。 $D = \begin{bmatrix} \bar{P} - P^0 \\ \bar{Q} - Q^0 \end{bmatrix}$ 表示节点注入功率变化。

设此电力系统共有 N 个节点, 其中 M 个为PQ节点。

$$P(X) = [P_1(X), P_2(X) \dots P_{N-1}(X)], \quad Q(X) = [Q_1(X), Q_2(X) \dots Q_M(X)]$$

$$P_i(X) = P_i^0 - V_i \sum_{j \in i} V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1)$$

$$Q_i(X) = Q_i^0 - V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in 1, 2, \dots, M)$$

P^0 和 Q^0 表示对应于系统基态下的节点净注入功率向量； \bar{P} 和 \bar{Q} 表示变化后节点的净注入功率向量。

当 $\lambda=0$ 时， $f(X, 0)=0$ 与系统基态相对应；当 $\lambda>0$ 时，式(2-2)与系统沿注入方向D变化后的某一系统运行点相对应。称式(2-2)为含参量的系统潮流方程，D为系统节点功率注入变化的方向向量， λ 为节点注入变化条件数。

由于系统输电能力和节点注入条件数之间存在的近似线性关系，系统输电能力的求解可以转化为求解满足各约束条件时 λ 的极值问题^[14]。

约束条件：

1. 正常运行条件下

(1) 潮流方程： $F(X, \lambda) = G(X) + \lambda D = 0$

(2) 电压约束： $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$

(3) 系统热稳定约束： $|T| \leq T_{\max}$

(4) 静态稳定约束： $H(X, \lambda) = 0$

2. 单一故障条件下

(1) 潮流方程： $F(X, \lambda) = G(X) + \lambda D = 0$

(2) 电压约束： $V^*_{\min} \leq V \leq V^*_{\max}$

(3) 系统热稳定约束： $|T| \leq T^*_{\max}$

(4) 静态稳定约束： $H(X, \lambda) = 0$

其中，静态稳定约束是指鞍结分岔点对应的电压稳定性约束，方程 $H(X, \lambda) = 0$ 表示由鞍结分岔点决定的约束方程。

2.2 连续性方法基础

在输电能力研究中，PV曲线的准确求取对于计算功率传输极限具有十分重要的意义。一个实际电力系统，随着负荷水平逐渐加大，系统的运行点将逐渐过渡到鞍结分岔点。此时，常规潮流计算方法所用到的雅克比矩阵接近奇异，这将导致潮流计算失效。连续性潮流计算就是为了克服常规潮流计算方法（如牛顿法、快速解耦法）出现病态这一问题而提出的。目前使用连续性方法求解系统输电能力的算法有CPFLOW, VSTB等。本章对区域比例负荷增长方式下的连续性潮流计算数学模型及算法流程作了详细阐述。

连续潮流法的过程大致如下：假定式(2-2)的维数为N，则它是由N个方程，N+1个变量组成的非线性方程组，其解在N+1维空间上定义了一个一维曲线 $X(\lambda)$ 。连

续性潮流计算方法要解决的问题就是从已知初始点 (X^0, λ^0) 开始, 在所需要的参数变化方向上获得 $X(\lambda)$ 曲线上一系列的点 (X', λ') 。最常用的连续性方法为预估-校正方法, 其主要思想是: 在已知 $X(\lambda)$ 曲线上的点 (X', λ') 的情况下, 通过某些途径获取下一解点的近似点 $(X^{(n+1)}, \lambda^{(n+1)})$, 然后以该近似点作为初始点, 采用非线性方程的求解方法获得下一解点的准确解 $(X^{(n+1)}, \lambda^{(n+1)})$ 。反复执行上述过程即可完成整个PV曲线的求取。其中获得点 $(X^{(n+1)}, \lambda^{(n+1)})$ 的过程为预估过程, 获得点 $(X^{(n+1)}, \lambda^{(n+1)})$ 的过程为校正过程。

具体来说, 可将连续性潮流方法分为以下几个环节: 方程的参数化、步长控制、预估环节、校正环节。

2.2.1 方程的参数化

参数化过程是一种确定解曲线上每一个点的方法, 通过它可以确定前解的下一个或前一个解, 方程参数化具有两方面的含义: 一是如何选择控制参数来区分曲线上各稳态解点的先后顺序; 二是通过参数化方程的建立, 克服方程在鞍结分岔点处的奇异。连续性方法不对式(2-2)单独求解, 而是求解下述扩展方程:

$$\begin{cases} F(X, \lambda) = 0 \\ Z(X, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

式(2.3)中的第二个方程即参数化方程, 是一维方程式。作为一个参数化方程, 需要满足一个重要的条件, 即能够保证最终形成的扩展方程的雅克比矩阵方程在潮流方程鞍结分岔点处非奇异。目前所采用的连续性潮流算法中, 有两种最为典型的参数化方法^{[24], [26]}:

1. 局部参数化方法

以状态向量 X 的某一分量 X_k 作为参数, 所选取的参数也可以随解的变化相应变化, 此时的参数变化步长为 ΔX_k , 参数化方程可选取为:

$$Z(X', \lambda') = (X'_k - X_k^{(l)})^2 - \Delta X_k^2 = 0 \quad (2-4)$$

即当沿解曲线从 $(X^{(l)}, \lambda^{(l)})$ 向 (X', λ') 点过渡时, 作为控制参数的状态 X 的分量 X_k 的变化量应保持为其步长值 ΔX_k 不变。

在电压稳定性分析中, 当采用这种参数化方法时, 常选取求解过程中电压下

降最快的节点电压作为控制参数。文献[26]介绍了一种只以PQ母线电压做参数的参数化方法，该方法具有能根据PV曲线的形状自动调节步长大小，追踪效率高，收敛速度快等优点，是一种计算系统输电能力的好方法。

2. 弧长参数化方法

以解曲线的弧长 S 作为控制参数，此时的参数变化步长 ΔS 为：

$$\Delta S = \left[\sum_{i=1}^n (X_i - X_i(S))^2 + (\lambda - \lambda(S))^2 \right] \quad (2-5)$$

弧长参数化方法已经在CPFLOW, VSTB等一些程序中得到了应用，被证明是一种十分可靠的方法。

2.2.2 预估环节

预估环节的目的是由已知解出发为下一步校正过程的准确解寻找一个良好的近似解，该近似解的质量将直接影响到校正过程所用到的迭代次数。如果近似解和准确解很接近，那么校正环节只需要少量迭代就可以得到准确解；否则，就可能需要多次迭代才能收敛，甚至不收敛。因此，预估环节的结果将直接影响到整个连续性方法的计算效率。

预估环节常用的方法是切线法和割线法。切线法是一种单步法，可以自启动；割线法则需要前两步的计算结果，因此需要其它算法作为启动算法。由于割线法在求解曲率较大的预估效果不如切线法，现以切线法为例说明预估过程。

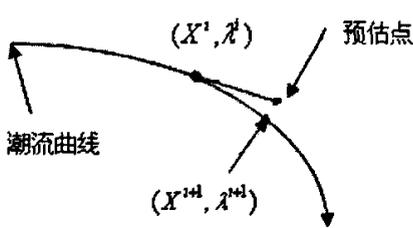


图2-1切线预估法

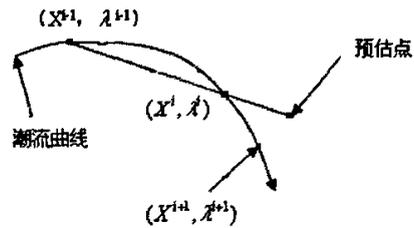


图2-2割线预估法

要求曲线 $F(X, \lambda) = 0$ 在点 (X^0, λ^0) 处的切向量，先对 $F(X, \lambda) = 0$ 求导得：

$$DF(X, \lambda) = F_X dX + F_\lambda d\lambda = 0 \quad (2-6)$$

转化为矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} F_X & F_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (2-7)$$

式中 $F_X \in R^{N \times N}$, $F_\lambda \in R^{N \times 1}$, $dX = [dX_1, dX_2, \dots, dX_N]^T$

式(2-7)为切向量 $dX = [dX_1, dX_2, \dots, dX_N]$ 所应满足的方程。但由于其中 $N+1$ 变量只有 N 个方程, 所以无法直接求解, 需要增加一维规范化方程。

可令 $dX_p = \pm 1 (P=1, 2, \dots, N)$ 与式(2-7)联立解得:

$$\begin{bmatrix} F_X & F_\lambda \\ e_p & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dX \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

e_p 是 $N+1$ 维行向量, 除了第 P 个元素为 1 外, 其余各元素均为零, 正负号用来指示曲线追踪方向, 若希望在追踪方向上 dX_p 减小, 则取负号, 反之则取正号。

为避免方程(2-8)出现病态, X_p 应该选择当前变化最大的量。如下所示, 求 P 满足:

$$|dX_p| = \max_{j=1}^n \{dX_j\} \quad (2-9)$$

第一步预测时连续性参数还未知, 一般选择 $d\lambda = 1$, 经过验证, 这种方法对电力系统连续性潮流计算来说是适用的。

2.2.3 步长控制环节

确定步长 σ , 根据其预测计算初值:

$$\begin{bmatrix} X^{i+1} \\ \lambda^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X^i \\ \lambda^i \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dX \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

步长的选择既要考虑方程收敛性也要考虑曲线的追踪效率。选择小的步长固然对任何连续过程都适用，但会增加冗余过程，降低曲线追踪效率；但选择过大步长又可能导致解的不收敛。目前并没有统一的步长控制方法，需要根据实际情况进行调整。

2.2.4 校正环节

根据校正方程的不同，校正方法可以分为局部校正与弧长校正两种。

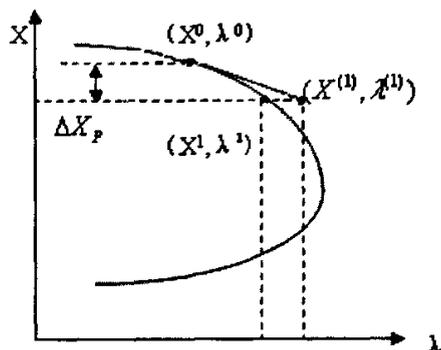


图2-3局部校正

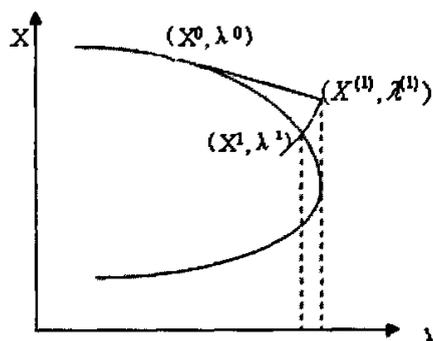


图2-4弧长校正

局部校正法如图2-3所示，它增加的一维校正方程为 $X_p - X_p^{(i)} = 0$ 与

$F(X, \lambda) = 0$ 联力得：

$$\begin{cases} F(X, \lambda) = 0 \\ X_p - X_p^{(i)} = 0 \end{cases} \quad (2-11)$$

式中 X_p 为预测环节选出来的连续性参数， $X_p^{(i)}$ 为预测得到的初值。然后根据初值 $(X^{(i)}, \lambda^{(i)})$ 利用牛顿迭代法解非线性方程组 (2-11) 得：

$$-\begin{bmatrix} F_x(X^{(i)}, \lambda^{(i)}) & F_\lambda(X^{(i)}, \lambda^{(i)}) \\ e_p & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X^{(i)} \\ \Delta \lambda^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(X^{(i)}, \lambda^{(i)}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

求得修正量 $\Delta X^{(i)}$ 和 $\Delta \lambda^{(i)}$ ，并根据修正量修正 X 和 λ 的值。

$$\begin{cases} X^{(i+1)} = X^{(i)} + \Delta X^{(i)} \\ \lambda^{(i+1)} = \lambda^{(i)} + \Delta \lambda^{(i)} \end{cases} \quad (2-13)$$

弧长校正法如图2-4所示，增加一维校正方程，与 $F(X, \lambda) = 0$ 联力得：

$$\begin{cases} F(X, \lambda) = 0 \\ \Delta S^2 = 0 \end{cases} \quad (2-14)$$

$$\text{式中 } \Delta S^2 = \sum_{j=1}^n (X_j^{i+1} - X_j^i)^2 + (\lambda^{i+1} - \lambda^i)^2 - \sum_{j=1}^n (X_j^{(i+1)} - X_j^i)^2 - (\lambda^{(i+1)} - \lambda^i)^2$$

其修正方程式与局部校正类似，只是雅可比矩阵发生变化：

$$-\begin{bmatrix} F_X(X^{(i)}, \lambda^{(i)}) & F_\lambda(X^{(i)}, \lambda^{(i)}) \\ 2(X_1^{(i)} - X_1^{i-1}) \dots 2(X_n^{(i)} - X_n^{i-1}) & 2(\lambda^{(i)} - \lambda^{i-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X^{(i)} \\ \Delta \lambda^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(X^{(i)}, \lambda^{(i)}) \\ \Delta S^{2(i)} \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

求修正量的方程与局部校正相同。

2.3 连续性潮流追踪

2.3.1 实用化含参数潮流模型

2.1节中把潮流方程随系统注入变化的参量形式表示为

$$F(X, \lambda) = G(X) + \lambda D = 0$$

$$\text{式中 } G(X) = \begin{bmatrix} P(X) \\ Q(X) \end{bmatrix}$$

$$P_i(X) = P_i^0 - V_i \sum_{j \in i} V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1)$$

$$Q_i(X) = Q_i^0 - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in 1, 2, \dots, M)$$

D代表节点注入功率变化方向， λ 表示节点注入功率变化大小，N为节点数，M为PQ节点数。基于这种形式的参量方程需假定 λ 增大时节点注入变化方向D恒定，这在实际电力系统中是不现实的。因为负荷增长的非线性，发电机功率调节的限制等均难以保证节点注入功率变化方向D的恒定。为此建立新的以总有功负荷为参数的潮流方程：

$$P_{iG}(\lambda) - P_{iL}(\lambda) - V_i \sum_{j \in i} V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1) \quad (2-16)$$

$$-Q_{iL}(\lambda) - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (i \in 1, 2, \dots, M) \quad (2-17)$$

式中 N 为节点数， M 为PQ节点数。

用 $\theta = [\theta_1, \theta_2 \dots \theta_{N-1}]^T$ ， $V = [V_1, V_2 \dots V_M]^T$ 表示向量，上式可简写为：

$$\begin{cases} P(\theta, V, \lambda) = 0 \\ Q(\theta, V, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (2-18)$$

参数 λ 表示负荷增长区各节点的有功负荷总和。

$$P_i(\theta, V, \lambda) = P_{Gi}(\lambda) - P_{Li}(\lambda) - V_i \sum_{j \in i} V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1)$$

$$Q(\theta, V, \lambda) = -Q_{Li}(\lambda) - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (i \in 1, 2, \dots, M)$$

$P_{Gi}(\lambda)$ 表示各发电机节点有功功率与总有功负荷的在特定调度方式下的函数关系。

$P_{Li}(\lambda)$ ， $Q_{Li}(\lambda)$ 表示各节点负荷功率与总有功负荷在特定负荷增长方式下的函数关系。

最简单的负荷增长方式为区域比例负荷增长方式，定义如下：

考虑具有 N_L 个节点的负荷增长区，各节点负荷为 $P_{iL} + jQ_{iL}$ $i = (1, 2, \dots, N_L)$ ，负荷

增长区各节点负荷总和为 $P_L + jQ_L = \sum_{i=1}^{N_L} P_{iL} + j \sum_{i=1}^{N_L} Q_{iL}$ ，当总有功负荷微增量为 dP_L

时，各节点负荷的变化规律如下：

$$\begin{aligned} dP_{iL} &= \frac{P_{iL}}{P_L} \cdot dP_L & (i=1, 2, \dots, N_L) \\ dQ_{iL} &= c \tan \phi_i \cdot dP_{iL} \end{aligned} \quad (2-19)$$

式中， dP_{iL} 表示各节点负荷微增量， ϕ_i 为各节点负荷增长功率因数角。

特别当 $c \tan \phi_i = \frac{Q_{iL}}{P_{iL}}$ 时 $\frac{P_{iL}}{Q_{iL}} = \frac{dP_{iL}}{dQ_{iL}}$ ，易知，以这种方式增长的负荷，各节点

的负荷功率因数始终与基态时保持一致，因此这种方式又称为恒功率因数增长。此时：

$$\begin{aligned} dP_{il} &= \frac{P_{il}}{P_L} \cdot dP_L \\ dQ_{il} &= \frac{P_{il}}{P_L} \cdot dQ_L \end{aligned} \quad (2-20)$$

因为 λ 表示负荷增长区的总有功负荷, 即 $\lambda = P_L$, 故 $d\lambda = dP_L$, 代入上式得:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{il}}{d\lambda} &= \frac{P_{il}}{P_L} \\ \frac{dQ_{il}}{d\lambda} &= \frac{P_{il}}{P_L} \end{aligned} \quad (2-21)$$

2.3.2 连续性潮流计算步骤

如果不考虑发电机功率调节的影响, 认为因负荷增长导致的有功缺额由平衡机承担, 式(2-18)中各发电机功率可视为恒定不变。下一章中就将就发电机有功调节问题进行专门讨论。

不考虑发电机功率调节的连续性潮流法求解传输极限的步骤同样遵循预估, 步长控制, 校正三个环节。

1. 预估环节

1) 首先求取切向量, 根据式(2-18)的潮流方程, 切向量 $(d\theta, dV, d\lambda)$ 满足下式:

$$\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} & J_{P\lambda} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} & J_{Q\lambda} \\ e_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

雅可比矩阵子矩阵 $J_{P\theta} = \partial P / \partial \theta$, $J_{PV} = \partial P / \partial V$, $J_{Q\theta} = \partial Q / \partial \theta$, $J_{QV} = \partial Q / \partial V$

$$J_{P\lambda} = \partial P_i / \partial \lambda = -\frac{dP_{il}}{d\lambda} = -\frac{P_{il}}{P_L}, \quad J_{Q\lambda} = \partial Q_i / \partial \lambda = -\frac{dQ_{il}}{d\lambda} = -\frac{Q_{il}}{P_L}$$

e_p 为除了第 p 个元素为 1, 其余元素均为 0 的向量, 当初始从基值预估时, 此时的 PV 曲线一般比较平滑, 连续性参数一般选取 λ 。

实际上, 为了保持雅可比矩阵的对称性, 一般采用如下公式替代式(2-22)

$$\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \cdot V_D & J_{P\lambda} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \cdot V_D & J_{Q\lambda} \\ & e_p & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ V_D^{-1} \cdot dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

2) 连续性参数的选取

由于 $d\theta, dV, d\lambda$ 量纲分别为弧度, 电压标么值, 功率标么值, 它们之间难以互相比较。实践表明, 随着负荷增大, 某些弱节点电压下降显著。为此, 只在 $V_i (i=1, 2, \dots, M)$ 中选择连续性参数

考虑到标么值下 $V_i \approx 1, dV_i / V_i \approx dV_i$, 在 dV_i / V_i 中求取的最大值在 dV_i 中也近似成立, 因此求 P 满足:

$$\left| \frac{dV_p}{V_p} \right| = \max_{i=1}^M \left\{ \left| \frac{dV_i}{V_i} \right| \right\} \quad (2-24)$$

V_p 就是所求的连续性参数。

2. 步长控制环节

确定步长 σ , 并预测下一步解

$$\begin{aligned} \theta^1 &= \theta^0 + \sigma \cdot d\lambda \\ V^1 &= V^0 + \sigma \cdot dV \end{aligned} \quad (2-25)$$

令总负荷增量 $dP_L = \sigma \cdot d\lambda$, 根据 (2-20) 式预测增长区各节点负荷

$$\begin{aligned} P_{il}^1 &= \left(1 + \frac{dP_L}{P_L^0}\right) \cdot P_{il}^0 \\ Q_{il}^1 &= \left(1 + \frac{dP_L}{P_L^0}\right) \cdot Q_{il}^0 \end{aligned} \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1) \quad (2-26)$$

对连续性参数 V_p 来说, 由式 (2-25) 知 $|V_p^1 - V_p^0| = \sigma$, 一旦 σ 取值恒定则近

似在纵向作等间距分割。PV 曲线在开始部分截点相对稀疏, 而在鞍节点附近相对稠密, 这样正好实现了步长控制的目的。

3. 校正环节

按照局部校正格式形成校正方程组如下:

$$\begin{cases} P(\theta, V, \lambda) = 0 \\ Q(\theta, V, \lambda) = 0 \\ V_p - V_p^1 = 0 \end{cases} \quad (2-27)$$

迭代格式如下:

$$-\begin{bmatrix} J^{(K)}_{P\theta} & J^{(K)}_{PV} \cdot V_D & J^{(K)}_{P\lambda} \\ J^{(K)}_{Q\theta} & J^{(K)}_{QV} \cdot V_D & J^{(K)}_{Q\lambda} \\ e_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta^{(K)} \\ V_D^{-1} \cdot \Delta V^{(K)} \\ \Delta\lambda^{(K)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(\theta^{(K)}, V^{(K)}, \lambda^{(K)}) \\ Q(\theta^{(K)}, V^{(K)}, \lambda^{(K)}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

$$\begin{aligned} \theta^{(K+1)} &= \theta^{(K)} + \Delta\theta^{(K)} \\ V^{(K+1)} &= V^{(K)} + \Delta V^{(K)} \end{aligned} \quad (2-29)$$

$$\begin{aligned} P_{iL}^{(K+1)} &= \left(1 + \frac{\Delta\lambda^{(K)}}{P_L^{(K)}}\right) \cdot P_{iL}^{(K)} \\ Q_{iL}^{(K+1)} &= \left(1 + \frac{\Delta\lambda^{(K)}}{P_L^{(K)}}\right) \cdot Q_{iL}^{(K)} \end{aligned} \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1) \quad (2-30)$$

收敛条件为:

$$\left\| \begin{matrix} P(\theta^{(K)}, V^{(K)}, \lambda^{(K)}) \\ Q(\theta^{(K)}, V^{(K)}, \lambda^{(K)}) \end{matrix} \right\| < \varepsilon$$

下面给出连续性解曲线追踪的算法流程:

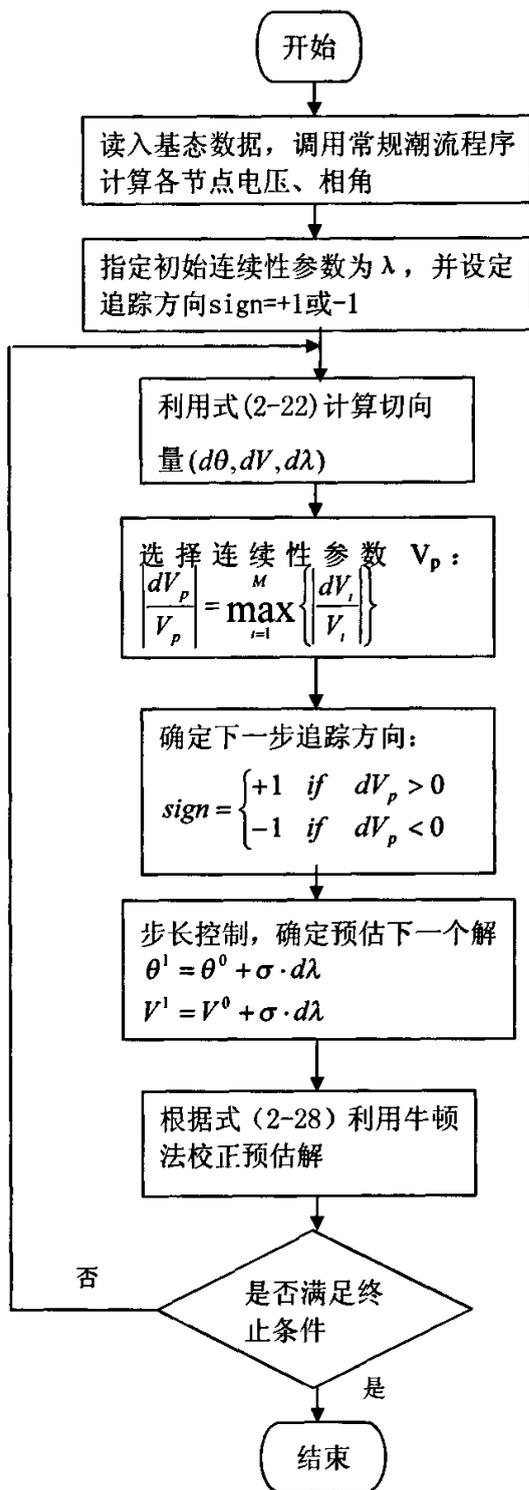


图2-5连续性解曲线追踪的算法流程图

第三章 考虑特定运行条件下输电能力的计算

3.1 输电能力与发电机的关系

同步发电机是电力系统主要的无功来源，它对维持电压稳定具有十分重要的作用，失去无功储备系统电压将难以维持，处理好同步发电机的无功能力对准确计算电力系统的功率传输能力具有重要意义。事实证明，在大多数实际发生的电力系统电压失稳事故中，总有一台或几台重要的发电机工作在其无功输出的极限处。研究表明同步发电机的无功极限与其有功输出有关，甚至机端母线的电压变动^{[27]-[30]}也会对其有影响，像AGC机组、热备用机组以及调峰机组等需要更加详尽的无功能力模型用于输电能力研究。下面就介绍发电机能力曲线。

发电机无功功率容许范围是通过发电机能力曲线表示出来的。以隐极同步发电机为例，在忽略定子电阻情况下，发电机能力曲线可以由图3-1中AB, BC, CD段表示。弧AB表示励磁电流限制，弧BC表示定子电流限制，CD段表示欠励运行限制，EF, BG表示有功功率限制，未受无功限制的均为AVR自动励磁调节区。上述限制，构成了同步发电机稳态可行域，图中阴影部分所示。

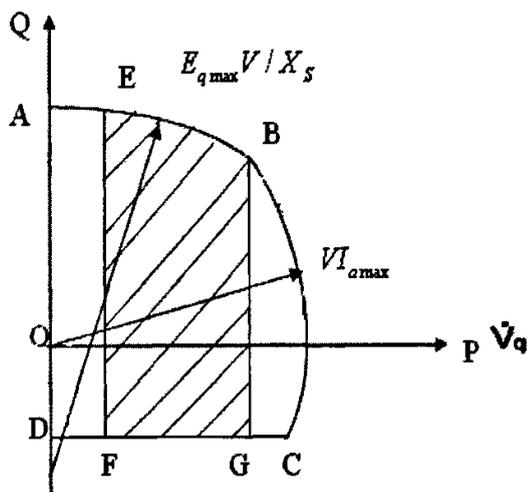


图3-1发电机能力曲线图

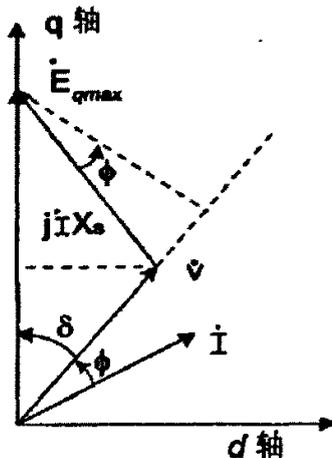


图3-2同步发电机稳态运行向量图

1. 励磁电流的限制

受转子冷却系统的限制，同步发电机励磁电流长期运行允许值一般不能超过额定值的1.05-1.1倍，具体数值由过励磁限制器（OXL）决定。处于OXL限制下的同步发电机励磁电流恒定，可由空载电势 E_q 恒定模型来表示，此时 $E_q = E_{q,max}$ ，

向量关系如图3-2所示。

由向量知：

$$\begin{aligned} I \sin \phi &= \frac{E_{q \max} \cos \delta - V}{X_s} \\ I \cos \phi &= \frac{E_{q \max} \sin \delta}{X_s} \end{aligned} \quad (3-1)$$

式中 V 为机端电压， I 为定子电流， δ 为功角， ϕ 为功率因数角， X_s 为同步电抗。

因此可得发电机机端功率：

$$\begin{aligned} P &= \frac{E_{q \max} V}{X_s} \sin \delta \\ Q &= \frac{E_{q \max} V}{X_s} \cos \delta - \frac{V^2}{X_s} \end{aligned} \quad (3-2)$$

消去 δ 得：

$$P^2 + \left(Q + \frac{V^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{E_{q \max} V}{X_s}\right)^2 \quad (3-3)$$

由上式可解得发电机无功出力：

$$Q_{f \max} = \sqrt{\left(\frac{E_{q \max} V}{X_s}\right)^2 - P^2} - \frac{V^2}{X_s} \quad (3-4)$$

这就是考虑励磁电流限制下发电机无功出力极限，它表示图中弧AB段，圆心在点 $(0, -\frac{V^2}{X_s})$ 处，半径为 $\frac{E_{q \max} V}{X_s}$ 。

2. 定子电流限制

与励磁电流限制相同，定子电流由于冷却系统的限制，其长期运行的最大允许值一般为额定值的1.05倍。根据容量计算公式，可得：

$$S_{\max}^2 = P^2 + Q^2 = (VI_{\max})^2 \quad (3-5)$$

从中解得定子电流限制下，发电机无功出力极限值：

$$Q_{a\max} = \sqrt{(VI_{\max})^2 - P^2} \quad (3-6)$$

它对应于图中弧BC段，圆心为原点，半径为 VI_{\max} 。

3. 欠励运行限制

同步发电机运行时，出于定子迭片涡流发热以及功角稳定的考虑，需要对发电机所吸收的无功做出限制。在电压稳定性分析中，用恒定值 Q_{end} 表示。

总之，对与发电机机端电压 V 和有功功率 P ，其无功极限可以表示为：

$$Q_{\max} = \min(Q_{f\max}, Q_{a\max}) \quad (3-7)$$

$$Q_{\min} = \max(Q_{end}, -Q_{a\max}) \quad (3-8)$$

4. 有功出力限制

P_{\min} 一般指火力机组的最小出力，水电机组一般无此限制。

P_{\max} 多出于运行安全的考虑，一般为额定电压下定子电流限制和励磁电流限制所决定的两条弧的交点。

考虑凸极效应时，由励磁电流限制决定的无功能力曲线与隐极机极为相似，当 X_d 与 X_q 接近时，可以取 $X_s = X_d$ ，以隐极机模型代替凸极机模型，其误差很小，满足工程计算要求。此外，凸极机的其余限制均与隐极机相同。

3.2 输电能力与负荷特性

负荷特性是电压稳定问题的实质，它的变化直接导致系统运行状态发生变化，不同特性的负荷对系统稳定性带来的影响也有很大差别，因此针对不同的问题使用与之相适的负荷模型对输电能力的求解具有重要的意义。电力系统内负荷数量众多，结构复杂，负荷建模十分困难，其核心问题是确定某一特定时刻负荷的构成情况和各成分模型。

多数情况下，负荷对系统中出现的扰动反应比较快，能在较短的时间内达到一个稳态值，当电压和频率的变化在一定范围内时，可以近似认为负荷特性是静态的。在电力系统静态分析中通常使用两种负荷模型^{[31], [32]}：指数型负荷模型和

多项式型负荷模型。

3.2.1 指数型负荷模型

指数型负荷应用比较广泛，其基本形式为：

$$P = cP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (3-9)$$

$$Q = cQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (3-10)$$

式中 c 为标量， V_0 是参考电压，指数 α, β 随负荷类型的变化而变化， cP_0 和 cQ_0 对应于负荷母线电压 V 等于参考电压 V_0 时所消耗的功率^[33]，它于所连设备的数量有关。有三种比较特殊的指数型负荷：

(1) $\alpha = \beta = 2$ (恒阻抗负荷，简写成Z)

(2) $\alpha = \beta = 1$ (恒电流负荷，简写成I)

(3) $\alpha = \beta = 0$ (恒功率负荷，简写成P)

此外，电力系统还有不少分数型指数的指数型负荷，表3-1列出了几种比较典型的分数型指数的负荷特性^[34]。

表3-1分数型指数负荷示例

负荷组成	α	β
白炽灯	1.54	-
小型荧光灯	0.95-1.03	0.31-0.46
普通荧光灯	2.07	3.21
空调	0.5	2.5
锅炉风机	0.08	1.6
充电器	2.59	4.06

α, β 决定了负荷功率对电压的灵敏度，设 $c=1, V=V_0$ ，则有功功率对电压的灵敏度为：

$$\frac{dP}{dV} = \alpha P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\alpha-1} \frac{1}{V_0} \quad (3-11)$$

同理无功功率对电压的灵敏度为：

$$\frac{dQ}{dV} = \beta Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\beta-1} \frac{1}{V_0} \quad (3-12)$$

整理得， $V=V_0$ 时的灵敏度：

$$\frac{dP/P_0}{dV/V_0} = \alpha \quad (3-13)$$

$$\frac{dQ/Q_0}{dV/V_0} = \beta \quad (3-14)$$

由此可见，额定电压下，有功功率和无功功率对电压的灵敏度就等于相应的负荷的指数^[23]。

3.2.2 多项式型负荷模型

多项式型负荷模型其实就是指数全都是整数的指数型负荷的组合。其中有一种特殊的ZIP型，这种负荷由恒阻抗、恒电流和恒功率型负荷三部分组成，其负荷模型如下：

$$P = cP_0 \left[a_p \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_p \right] \quad (3-15)$$

$$Q = cQ_0 \left[a_Q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_Q \left(\frac{V}{V_0} \right) + c_Q \right] \quad (3-16)$$

式中 $a_p + b_p + c_p = a_Q + b_Q + c_Q = 1$ ， cP_0 和 cQ_0 对应于负荷母线电压 V 等于参考电压 V_0 时所消耗的功率。

在电力系统中，还存在大量的无功补偿装置，这些设备对于系统无功的合理

分布、减小网络中有功损耗和电压损耗具有十分重要的意义。无功补偿装置实际上就是一种特殊类型的负荷，在实际计算中可以认为是所在母线上并联的导纳。根据调节方式的不同可以将无功补偿装置分为离散式和连续式两种，在实际计算中，两者的调节方式为：

1. 对于离散式无功补偿设备来说，如果所控制母线的电压低于最低电压限制，则按先减少感性电纳、后增加容性电纳顺序调节；如果所控制母线的电压高于最高电压限制，则按先减少容性电纳、后增加感性电纳顺序调节，调节过程将一直持续到母线电压满足要求或补偿设备无法继续调节为止。

对于连续型无功补偿设备来说，为了维持所控制母线的电压在允许范围之内，补偿设备将在可调节范围内连续地调节，其电纳值可以是允许范围内的任意值。

3.3 计及发电机功率调节的连续性潮流计算

上一章介绍的连续性潮流计算方法并未考虑发电机功率调节对系统的影响。在大型电力系统区域传输能力研究中，功率交换方案不仅涉及输出端系统负荷增长方式，还涉及送端系统发电机调度方式。当受端系统负荷增长时，如果仅由平衡机提供额外发电功率显然是不现实的，这必然需要增大送端系统具有功率调节能力的发电机出力以平衡有功需求。为此考虑发电机调度模型对于连续性潮流计算在传输能力中的应用具有重要意义。

发电机调度或功率调节方式主要有比例分配，发电计划分配，和调速器响应方式。这三种方式比较简单，适合研究计算用，更复杂的分配方式如经济调度，自动发电控制(AGC)等属于调度自动化的内容，已超出本文的研究范围。但是只要建立适当的调度算法，同样可推广到这些复杂调度方式。

3.3.1 发电机有功分配方式

考虑发电机有功限制的比例分配，计划分配，调速器响应方式等都可按如下递归定义。

定义3.1

具有功率调节能力的 N_G 台发电机，各发电机当前功率为 $P_{\kappa i 0} (i = 1, 2, \dots, N_G)$ ，

总输出功率 $P_{G0} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{iG0}$ 所需增力的总有功输出 ΔP_G 在各发电机的分配如下:

(1) 确定各发电机的有功分配系数 K_i , 计算有功增量 $\Delta P_{iG} = K_i \Delta P_G (i = 1, 2, \dots, N_G)$,

各发电机新的有功出力 P_{iGn} 为: $P_{iGn} = P_{iG0} + \Delta P_{iG}$ 。各机的分配系数总和应为1,

$$\text{即 } \sum_{i=1}^{N_G} K_i = 1。$$

(2) 若 $P_{iGn} > P_{iGMAX}$, 则令 $P_{iGn} = P_{iGMAX}$ (P_{iGMAX} 表示各发电机有功功率的上限)

因发电机功率越限引起的不足部分 $P_{Gleft} = \sum_{i=1}^{N_G} [(P_{iG0} + \Delta P_{iG}) - P_{iGn}]$ 将由其他仍具有

调节能力的发电机组继续按此方式分配。即令 $\Delta P_G = P_{Gleft}$ 并返回(1), 直到 P_{Gleft} 小于收敛误差方可结束。

发电机分配系数依分配方式而不同, 具体有:

1. 比例分配方式

比例分配方式下各发电机分配的功率与其当前有功功率成正比即分配系数 K_i 为:

$$K_i = \frac{P_{iG0}}{P_{G0}} (i = 1, 2, \dots, N_G) \quad (3-17)$$

由 $P_{G0} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{iG0}$ 可以验证:

$$\sum_{i=1}^{N_G} K_i = \frac{\sum_{i=1}^{N_G} P_{iG0}}{P_{G0}} = 1$$

2. 发电计划分配方式

所谓发电计划分配是按照增发计划列表, 从第一台发电机增加输出功率直至满发, 如不足将继续增发下一台发电机的出力以满足需求。

发电计划列表是按照机组平均运行费用由低到高顺序排列的, 平均运行费用

包括平均发电费用和平均启动费用,因此这一方法有时也称为优先级法机组经济组合^[36]。

按照这一规则,正在被调节而又未满发的发电机的分配系数 $K_i = 1$ 而其他发电机的分配系数等于0。

3. 调速器响应方式

当系统经历诸如负荷的突然变化这样的扰动时,在AGC动作之前,调速器的响应特性将决定发电机机组的功率分配方式,此时得到的系统近似稳态运行条件又称调速器响应潮流。

当频率变化 Δf 时调速器起作用的发电机的有功功率变化量为:

$$\Delta P_{G_i} = -\frac{1}{R_i} \Delta f \quad (i=1,2,\dots,N_G) \quad (3-18)$$

其中 R_i 为发电机 i 的调差系数。

令 $K_{G_i} = \frac{1}{R_i}$, K_{G_i} 称为发电机 i 的单位调节功率,则

$$\Delta P_{G_i} = -K_{G_i} \Delta f \quad (i=1,2,\dots,N_G) \quad (3-19)$$

$$\Delta P_G = \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i} = -\sum_{i=1}^{N_G} K_{G_i} \cdot \Delta f \quad (3-20)$$

两式相除得:

$$\frac{\Delta P_{G_i}}{\Delta P_G} = \frac{K_{G_i}}{\sum_{i=1}^{N_G} K_{G_i}} \quad (3-21)$$

这就是调速器响应方式下发电机的分配系数,即

$$K_i = \frac{K_{G_i}}{\sum_{i=1}^{N_G} K_{G_i}} \quad (i=1,2,\dots,N_G) \quad (3-22)$$

在实际中，我们可以选定发电机使之参与上述调节或不参与调节。当参与调节时，其调节范围将控制在可调范围之内，超出调节范围时调速器将不起作用，发电机不参与调节。

3.3.2 考虑发电机功率调节的潮流计算

如果在负荷增长过程中需不断调节发电机功率以维持有功平衡，则发电机功率可视为总负荷 λ 的函数，把潮流方程写为：

$$P_{iG}(\lambda) - P_{iL}(\lambda) - V_i \sum_{j \in i} V_j (B_{ij} \sin \theta_{ij} + G_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (i \in 1, 2, \dots, N-1) \quad (3-23)$$

$$-Q_{iL}(\lambda) - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (i \in 1, 2, \dots, M) \quad (3-24)$$

忽略网损变化的情况下，发电机功率变化等于负荷变化，即 $dP_G = dP_L = d\lambda$ ，则：

$$\frac{dP_{Gi}}{d\lambda} = \frac{dP_{Li}}{dP_G} = K_i \quad (3-25)$$

因此式(2.22)中的雅可比子阵 $J_{P\lambda}$ 需做相应调整：

$$J_{P\lambda} = \frac{\partial P_i}{\partial \lambda} = \frac{dP_{iG}}{d\lambda} - \frac{dP_{iL}}{d\lambda} = K_i - \frac{P_{iL}}{P_L} \quad (3-26)$$

在预测环节与校正环节中也需不断调整各节点发电机功率。为此在(2.26)中增加节点发电功率预测公式：

$$P_{iG}^1 = P_{iG}^0 + K_i^0 \cdot dP_L \quad (3-27)$$

在(2.30)中增加节点发电功率修正公式：

$$P_{iG}^{(K+1)} = P_{iG}^{(K)} + K_i^{(K)} \cdot \Delta\lambda^{(K)} \quad (3-28)$$

可以看到上面所介绍的方法只适合于不考虑发电机功率限制的情况。考虑发电机功率限制的情况下发电机分配系数的确定比较复杂，而且如果每一次迭代都需要检验发电机功率是否越限，将严重影响计算效率。这里介绍一种实用方法，仅需在迭代的最后一次分配发电机功率即可近似满足工程计算的需要^{[36]-[37]}。

首先考虑系统的有功功率平衡：

$$P_{load} + P_{loss} = P_G + P_{balance} \quad (3-29)$$

线性化得：

$$\Delta P_{load} + \Delta P_{loss} = \Delta P_G + \Delta P_{balance} \quad (3-30)$$

式中 P_{load} 为负荷有功功率， P_{loss} 网络有功损耗， P_G 非平衡母线上发电机有功功率， $P_{balance}$ 平衡母线上的发电机功率。

先假定发电机不参与调节，即 $\Delta P_G = 0$ ，当牛顿校正收敛时，平衡节点的有功注入变化量等于负荷和网损的变化量，即 $\Delta P_{load} + \Delta P_{loss} = \Delta P_{balance}$ 。此时令 $\Delta P_G = \Delta P_{balance}$ ，并按3.3.1中介绍的分配方式调节各机组功率可兼顾负荷与网损的变化导致的有功失衡。由于有功功率主要受相角影响，在实际计算中无须等到电压收敛而只需相角收敛即可重新分配发电机。图3-3列出考虑发电机功率调节的连续性潮流计算校正过程，预测过程与图2-5基本一致。

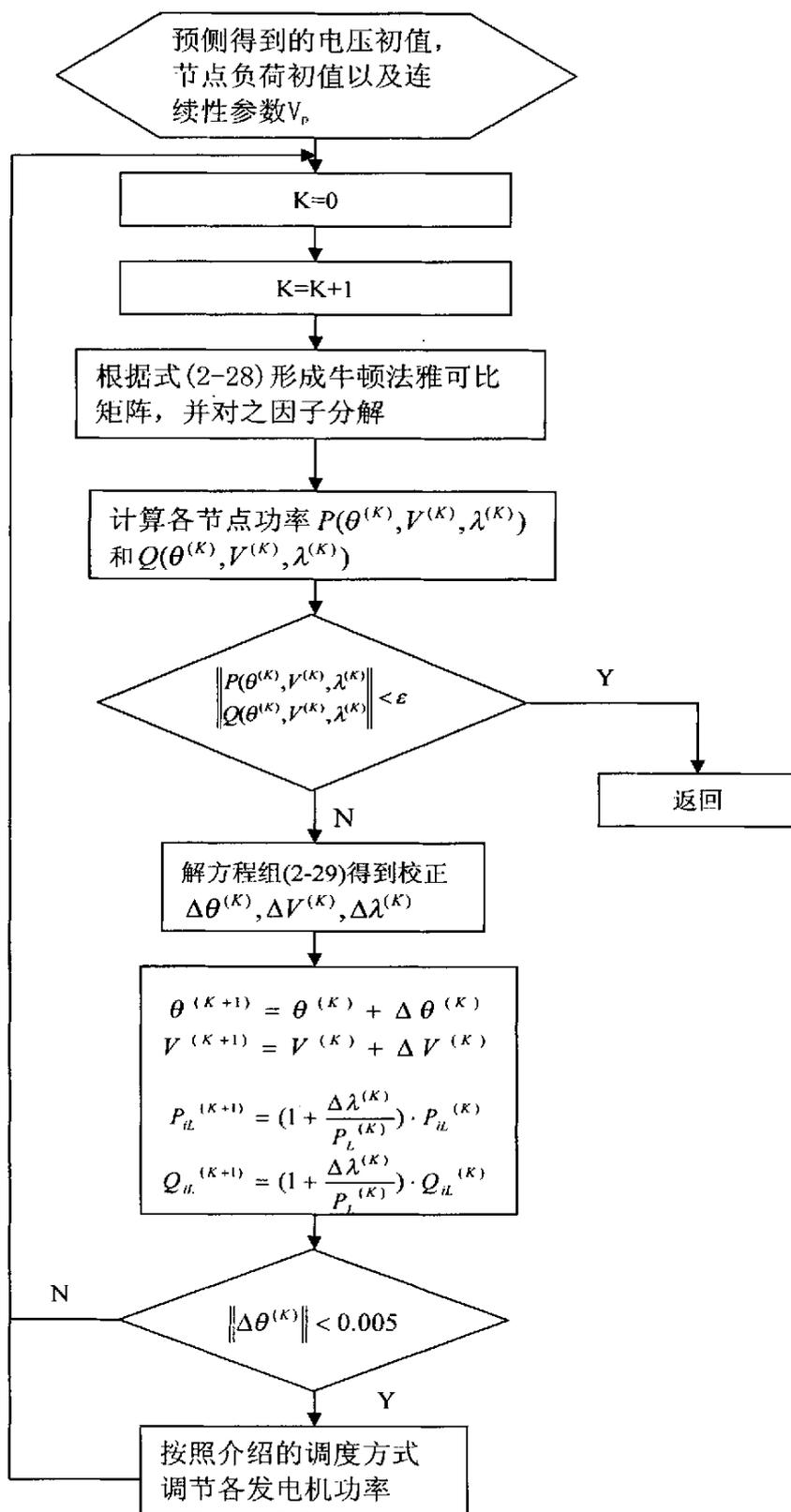


图3.3 考虑发电机功率调节的牛顿法潮流校正过程

第四章 考虑发电机无功极限输电能力的计算

4.1 引言

在电力系统电压稳定性分析中,表征功率极限和电压临界值的鞍节点,即临界点或崩溃点是个重要指标^[38]。功率极限点通常也被认为是仅有的鞍结分岔点,但实际上在电力系统中存在着另一种分岔点—临界约束变换点,这种情况在系统状态变量达到极限时可能发生,以潮流计算为基础的电压稳定分析,这种情况经常发生在电压控制节点(PV节点)达到无功极限时,此时约束条件的变化导致系统的功率极限发生变化。

崩溃点法在这种情况下不适用,因为它是建立在鞍结分岔点的潮流雅可比矩阵奇异的基础上的。而最优潮流法只在到达临界情况下有效,在没有到达临界点的中间的情况下,它也不起作用。传统的连续潮流法在这种条件下虽然仍然适用,但是在得到无功极限点的解时的收敛效率不高,对于具有很多台发电机的大型电力系统,此过程需耗费大量的时间计算,导致算法在实际情况中很难得到应用。

本章首先简述了约束变换点的概念和相关原理,然后采用了在此基础上的一种新的算法^{[39]-[43]},它改变了连续潮流法的做法,将发电机约束条件并入算法本身。算法主体思想是:首先根据初始值线性化约束条件预估下一个约束变换点,此解正是无功出力极限点的近似解,潮流方程校正得到约束变换点的精确解之后,根据约束条件判断该点是否稳定,如满足要求继续求解直到临界点为止。。由于该算法直接求取无功出力极限,所以大大减少了计算时间。最后用该方法计算 IEEE162、118、39 节点和云南某实际电网的输电能力极限,得到满意的结果。

4.2 算法的理论基础

4.2.1 约束变换点的概念

发电机与负荷端电压的典型 PV 曲线如图 4-1 所示,横坐标为负荷有功净增量。实线表示系统稳定运行区域,虚线表示不稳定运行区域。发电机为 PV 类型, O 为初始点,运行于基荷, D 为不考虑无功出力极限的鞍结分岔点。

随着负荷功率的不断增加,运行点从 O 逐渐过渡到 A,发电机达到无功上限 Q_1 ,此后发电机节点电压不再继续保持初值,实际上发电机由 PV 节点变成 PQ 节点。此后随着负荷功率的继续增加,它将沿无功值恒定的 PV 曲线 $Q=Q_1$

过渡到新的鞍结分岔点 B，由于 A 点位于曲线的上半部分，是稳定运行点，所以称 A 点为“稳定的约束变换点”（Constraint Exchange Point 简称 CEP）；如果发电机无功上限为 Q_2 ，这种情况下的 A 点位于曲线 $Q=Q_2$ 的下半支，在这种情况下系统无法继续运行到 C 点，曲线从 A 点直接分岔，A 点即为新的鞍结分岔点，此时的 A 点称为“临界约束变换点”；如果无功极限与 PV 的曲线交点位于 PV 曲线下半支，如图中 E 点，易知此点不稳定，那么此点称为“不稳定的约束变换点”。

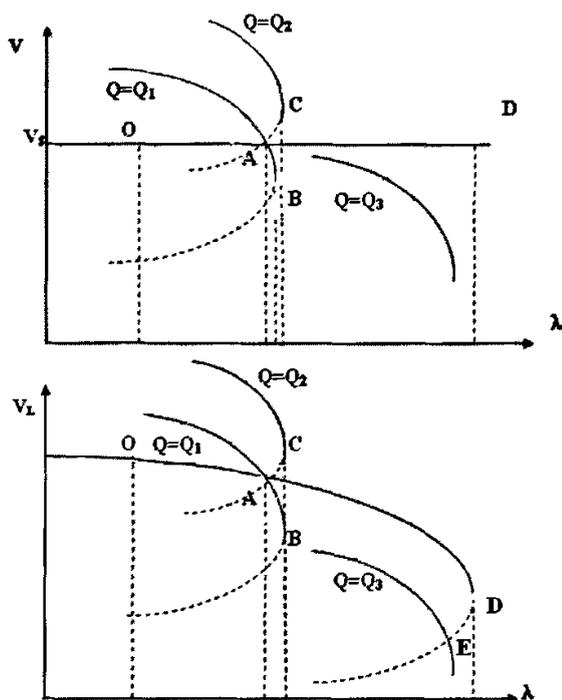


图 4-1 发电机与负荷端电压 PV 曲线

4.2.2 约束变换点的求取

通常一台 PV 发电机的约束条件随着负荷参数 λ 的值的改变相应的改变，具体表示如下：

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_{\min} (\lambda < \lambda_{\min}) \\
 V &= V_s (\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}) \\
 Q &= Q_{\max} (\lambda > \lambda_{\max})
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

λ_{\min} 与 λ_{\max} 是约束变换点(CEP), 而通常在约束变换点和它的两个相邻区域, 存在着一对等式约束和不等式约束, 负荷参数的变化会导致它们发生互换。以图 4-1 中 A 点为例:

$$V_s - V = 0 \quad Q_{\max} - Q \geq 0 (\lambda < \lambda_A) \quad (4-2)$$

$$Q_{\max} - Q = 0 \quad V_s - V \geq 0 (\lambda \geq \lambda_A) \quad (4-3)$$

Q_{\max} 为发电机无功出力上限, V_s 为 PV 节点电压初始值。

可以看到在约束变换点, QV 约束条件发生了变化, 条件 (4-3) 是为了防止运行区域超出临界约束变换点, 如图 AC 段曲线。

潮流问题实质是在给定负荷参数以及一些等式和不等式的约束下求取电压的解:

$$F(x, \lambda) = 0 \quad F: R^{N+1} \rightarrow R^N \quad (4-4)$$

$$G(x, \lambda) \geq 0 \quad G: R^{N+1} \rightarrow R^N \quad (4-5)$$

$x \in R^N$ 电压向量, $\lambda \in R^1$ 负荷参数, $F(x, \lambda) = 0$ 潮流方程, $G(x, \lambda) \geq 0$ 不等式约束。

潮流方程解一旦存在, 其对应的 λ 值也应该是唯一的, 如果用可行域来代表有解情况, 非可行域来代表无解情况, 两者之间为临界状态, 可以发现图中 AC 段是不可行, 因为它违背了不等式电压约束, 这样 A 点也是临界点, 由上可知, 临界点既可能是鞍结点也可能是临界约束变换点。

在大型电力系统中一般存在多个约束变换点, 如果用 Z_1, Z_2, \dots, Z_k 表示约束变换点, I_1, I_2, \dots, I_k 表示被它们分开的解区间。则区间 I_k 内的解可由下式解得:

$$F^{(k)}(x, \lambda) = 0 \quad F^{(k)}: R^{N+1} \rightarrow R^N \quad (4-6)$$

$$G^{(k)}(x, \lambda) \geq 0 \quad G^{(k)}: R^{N+1} \rightarrow R^N \quad (4-7)$$

由于(4-7)中不等式约束条件中的等号一般只能在约束变换点处获得, 如果用 $h^{(k)}(x, \lambda)$ 表示约束变换点处不等式约束, 则可解得约束变换点 $Z_k = (x_k, \lambda_k)$:

$$F^{(k)}(x, \lambda) = 0 \quad (4-8)$$

$$h^{(k)}(x, \lambda) = \min g_i^{(k)}(x, \lambda) = 0 \quad (4-9)$$

式 (4-9) 中 $g_i^{(k)}(x, \lambda)$ 是不等式约束 $G^{(k)}(x, \lambda)$ 中第 i 个条件。 $h^{(k)}(x, \lambda)$ 对应于图 4-1 中 A 点电压约束条件, 在上一个解区间它是潮流方程中一个等式约束条件, 在此区间才转化为不等式约束条件。

4.2.3 约束变换点的判定

通过式 (4-8) 和 (4-9) 得到的约束变换点 Z_k , 其类型未知, 需要判定其静态稳定性。可以通过下面两个条件确定所有的约束变换点的类型:

A 当 $\lambda > \lambda_k$ 时不存在稳定解区间 I_k ;

B 当 $\lambda > \lambda_k$ 时不存在稳定解区间 I_{k-1} 。

条件 B 考虑到了不稳定解的情况并对其加以限制。

条件 A 可以通过在区间 k 内线性化 (4-6) 和 (4-7) 得到:

$$[F_z^{(k)}]_{z^*} \cdot \delta z = 0 \quad (4-10)$$

$$\delta h^{(k)} = [h_z^{(k)}]_{z^*} \cdot \delta z \quad (4-11)$$

$h_z^{(k)}$ 为约束变换条件偏导向量, (4-10) 解为切向量, 将其带入 (4-11) 判断 δh 的符号。

条件 B 可以通过相似的手段得到:

$$[F_z^{(k-1)}]_{z^*} \cdot \delta \bar{z} = 0 \quad (4-12)$$

$$\delta h^{*(k)} = [h_z^{*(k)}]_{z^*} \cdot \delta \bar{z} \quad (4-13)$$

h^* 表示与在约束变换点 Z_k 与 h 发生互换的约束条件, 如 h 为电压约束条件, h^* 便是无功约束条件, 如果在求取 $\delta \bar{z}$ 的过程中得到 $\delta \bar{\lambda} = 0$, 那么此点为鞍结分岔点, 表 4-1 根据 δh 和 δh^* 的符号列举了所有约束变换点的类型。

表 4-1 约束变换点类型的判断

类型	δh	δh^*
稳定 CEP	+	+
临界 CEP	-	-
不稳定 CEP	-	+

4.3 算法的实现过程

4.3.1 预估环节

设稳态初始解 $Z_0 = (x_0, \lambda_0)$ ，在区间 $k+1$ 中预估一个近似的约束变换点 $\dot{z}_{k+1} = [\dot{x}_{k+1}, \dot{\lambda}_{k+1}]$ 。首先在点 Z_0 求取切向量 δz ，规格化 $\|\delta z\| = 1$ ，设步长为 s ，可以得到式(4-8)的近似解 Z ：

$$Z = Z_0 + s\delta z \quad s \in R^1 \quad (4-14)$$

元素 $g_i^{(k)}$ 可以根据上式近似表示为： $g_i^{(k)}(Z) \approx g_i^{(k)}(Z_0) + [\partial g_i^{(k)} / \partial Z] \cdot s \cdot \delta z$

令 $g_i^{(k)}(Z)$ 等于零得到此时步长：

$$s_i = -\frac{g_i^{(k)}(Z_0)}{[\partial g_i^{(k)} / \partial Z] \cdot \delta z} \quad (4-15)$$

$$\dot{Z}_{k+1} = Z_0 + s^* \cdot \delta z \quad (4-16)$$

式中

$$s^* = \min\{s_i\} \quad s_i > 0 \quad (4-17)$$

式(4-17)给出了离现在运行点最近的约束变换点的步长。文献[39]证明了若约束条件 a 为区间 $k+1$ 中等式约束，而之前它是不等式约束，则必定存在与之相对应的 \bar{a} ， \bar{a} 为区间 $k+1$ 的不等式约束，它们是同一台发电机中 VQ 约束条件的一对。

4.3.2 校正环节

利用牛-拉法解(4-8)和(4-9)，得到 CEP 的精确解 $z_{k+1} = [x_{k+1}, \lambda_{k+1}]$ ，校正方程式如下：

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_x & F_\lambda \\ h_x & h_\lambda \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

F_x 和 h_x 代表潮流雅可比矩阵，实际计算中可以通过上述预估环节获得跟精确解相近的初始解，这样可以减少迭代次数和计算时间。

4.3.3 此算法与传统连续潮流法的比较

将发电机无功极限作为约束条件，传统的连续潮流法理论上也能求得鞍结分岔点，但求解的效率却大打折扣，因为无论采用固定步长还是改变的步长，它只是逐渐逼近功率极限点即约束变换点，它不可能一次就得到约束变换点的解。以变步长算法说明，开始采用一个相对较大的步长，每当预估发现发电机无功越限后，将步长改成原来的1/4，直到接近约束变换点，通常在两个约束变换点之间至少需要2-3个这样的点过渡，也就是说要增加2-3个预估校正环节，影响其在约束变换点的收敛性。对于具有很多台发电机的大型电力系统，此过程需耗费大量的时间计算，影响算法在实际情况中的应用。

而此算法改变了连续潮流法的做法，将发电机约束条件并入算法本身，一次直接求得约束变换点，进而判断其静态稳定性，由于它在计算两个约束变换点之间不要求中间点的解，收敛速度快，因此大大提高了计算效率，减少了计算时间。

4.3.4 程序流程

步骤 1（初步计算）

求取基荷，初始状态 $z_0 = [x_0, 1]$ 。

步骤 2（求切向量）

通过 (4-10) 得到切向量 δz ，如果 $\delta \lambda = 0$ ，此点为临界点，程序停止，反之，规格化 $\|\delta z\| = 1$ 。

步骤 3 (确定约束条件)

计算确定 h 作为 G 中的最小元素， $\varepsilon = 10^{-6}$ ，如果 $h < \varepsilon$ 此点为 CEP 点，跳到步骤 4，如果 $h > \varepsilon$ ，跳到步骤 5

步骤 4 (判断是否满足条件 A)

通过 (4-11) 计算 δh ，如果 $\delta h > 0$ ，此点为稳定的 CEP 点，如果 $\delta h < 0$ ，跳到步骤 7

步骤 5 (确定步长)

根据 (4-16)、(4-17) 得到 Z 和 s^* ，如果所有的 s_i 都是负值，说明不存在 s^* 和下一个 CEP 点，跳到步骤 8

步骤 7 (迭代求解)

以 Z 为初始值解 (4-8) 和 (4-9)，如果收敛转到步骤 2，否则转到步骤 8

步骤 7(判断是否满足条件 B)

解满足 (4-12) 的切向量 $\delta \bar{z}$ ，根据 (4-13) 式计算 $\delta \bar{h}$ ，若 $\delta \bar{h} < 0$ ，此点为临界约束变换点，若 $\delta \bar{h} > 0$ 停止运行，此点为不稳定的 CEP 点，转到步骤 8。

步骤 8(无临界约束变换点的情况)

临界约束变换点在此系统中不存在，如果必要的话，可以以最后一个 CEP 点作为初始值按照传统连续潮流算法计算鞍结分岔点。

4.4 算例分析

先以 IEEE118 节点为例，负载各节点的有功和无功功率按其在基荷中所占比例增长，即恒功率因数增长；当各节点发电机达到无功上限前，有功功率按其在总的有功出力所占比例增长，送出端电压保持不变，达到无功上限后，保持无功功率不变，有功输出继续增加，无功出力由平衡机承担。

图 4-2 给出此方法和传统连续潮流方法得到的 PV 曲线。

不难发现两种方法得到的 PV 曲线十分吻合，临界状态发生在母线 10 达到无功上限时，证明了所述方法的正确性。

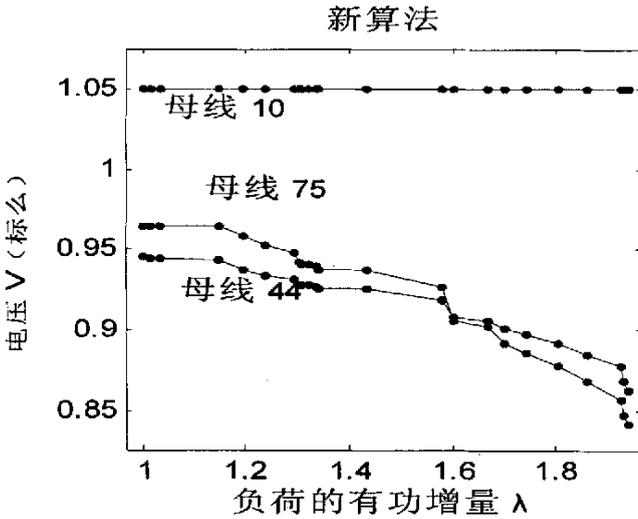
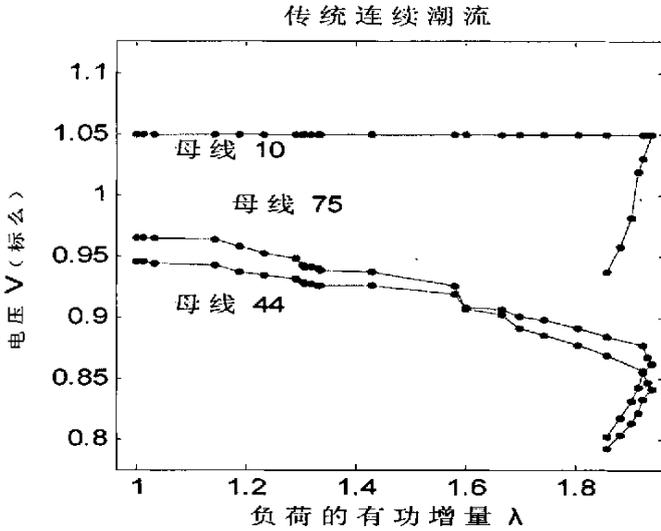


图 4-2 两种算法追踪 PV 曲线

表 4-2 列出了用该方法得到的从基荷到临界点的所有的约束变换点，以及负荷参数的值，约束变换点所在母线，迭代次数等相关系统信息。初始负荷 3668MW，收敛精度 10^{-6} 。

新方法的优越性在计算时间得到充分体现。在处理器 Pentium 4 2.8GHz, 256RAM 工作环境下,应用程序 Visual C++计算, 连续潮流法计算时间是 4.1 秒, 此算法为 1.3 秒, 计算时间节省 2/3 以上。

表 4-2 IEEE118 节点结果

序数	负荷参数	母线	约束类型	校正次数	节点类型
1	1.0016	77	无功上限	1	CEP
2	1.0149	62	无功上限	1	CEP
3	1.0340	74	无功上限	2	CEP
4	1.1458	76	无功上限	2	CEP
5	1.1912	56	无功上限	2	CEP
6	1.2362	15	无功上限	2	CEP
7	1.2924	1	无功上限	2	CEP
8	1.3029	34	无功上限	2	CEP
9	1.3063	12	无功上限	1	CEP
10	1.3200	105	无功上限	2	CEP
11	1.3334	110	无功上限	1	CEP
12	1.3371	18	无功上限	1	CEP
13	1.4305	104	无功上限	1	CEP
14	1.5802	6	无功上限	2	CEP
15	1.6037	59	无功上限	2	CEP
16	1.6674	46	无功上限	1	CEP
17	1.6998	54	无功上限	2	CEP
18	1.7433	32	无功上限	2	CEP
19	1.8053	49	无功上限	2	CEP
20	1.8579	100	无功上限	2	CEP
21	1.9245	8	无功上限	2	CEP
22	1.9317	4	无功上限	2	CEP
23	1.9403	10	无功上限	2	临界 CEP

通过上面表格可以看出系统的收敛性能良好,即使在临界点附近只需两次迭代也可收敛。

为了说明算法收敛性能,图 4-3 给出了求解约束变换点母线 12 时达到收敛精度要求所有校正过程结果,所有的电压初值设为 $1+j0$,类似于常规潮流计算,相当于独立的计算第 9 个约束变换点,即表 4-2 中 $\lambda = 1.3063$ 时的情况。

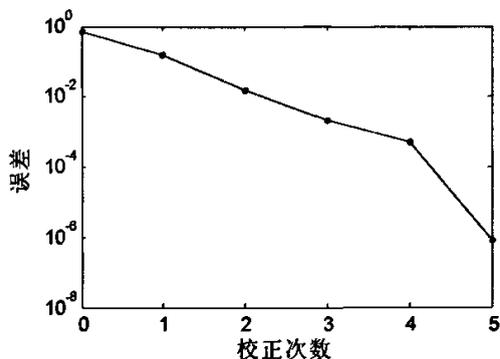


图 4-3 校正环节收敛特性

算法显示了良好的收敛性能,实际上从上面初始值得到表 4-2 中任意一个约束变换点的迭代都不超过六次,在表 4-2 中未出现的 PV 母线要么未达到极限,要么就是解在曲线的下半部分,属于不稳定的状态。通过实际计算表明只要约束变换点存在,即使它在曲线的下半部分,此算法也可以快速收敛。

在有些实际场合,只需要粗略的分析系统的情况,在这种情况下可以通过修改步长确定环节,不选择最接近现行运行点的约束变换点,而选择更远一点的约束变换点,这样可以简化分析,节约时间。表 4-3 列出了采用粗略步长控制得到结果,仅仅通过三次预估、校正求解就得到了临界约束变换点。

表 4-3 采用步长控制 IEEE118 节点结果

序数	负荷参数	母线	约束类型	校正次数	节点类型
1	1.3063	12	无功上限	3	CEP
2	1.7433	32	无功上限	3	CEP
3	1.0340	10	无功上限	4	临界 CEP

下面是 IEEE162 节点算例，负荷和发电机增长方式同上，图 4-4 为两种情况下的 PV 曲线：

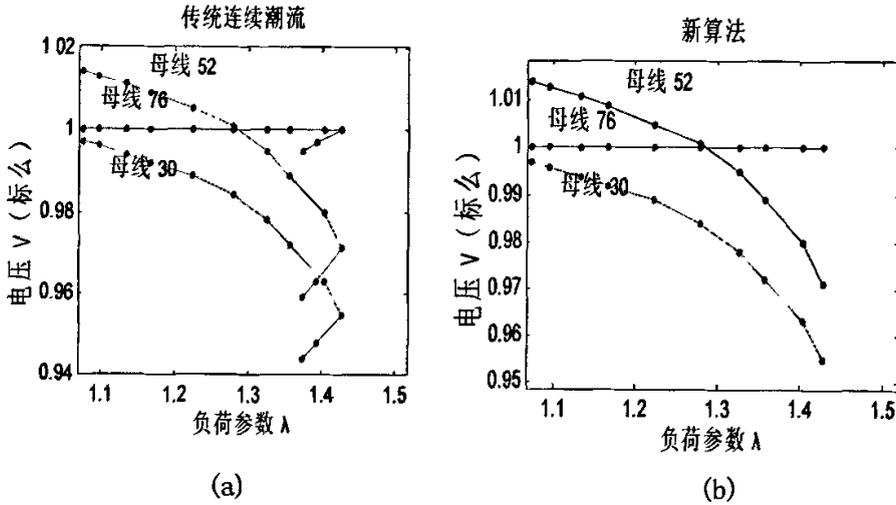


图 4-4 两种算法追踪 PV 曲线

表 4-3 给出了从基荷到临界点的系统信息，临界状态发生在母线 76 达到无功上限时，初始负荷 15550MW，收敛精度 10^{-6} 。系统工作环境同上，连续潮流法计算时间是 1.7 秒，此算法为 0.5 秒。

表 4-3 IEEE62 节点结果

序数	负荷参数	母线	约束类型	校正次数	节点类型
1	1.0746	101	无功上限	1	CEP
2	1.0955	114	无功上限	1	CEP
3	1.1341	118	无功上限	2	CEP
4	1.1669	99	无功上限	2	CEP
5	1.2227	121	无功上限	2	CEP
6	1.2782	130	无功上限	2	CEP
7	1.3253	131	无功上限	2	CEP
8	1.3569	73	无功上限	2	CEP
9	1.4037	6	无功上限	2	CEP
10	1.4274	76	无功上限	2	临界 CEP

表 4-4 为 IEEE 新英格兰 39 节点算例结果，初始基荷 5127MW，收敛精度 10^{-6} ，计算时间 0.35 秒，原连续潮流法计算时间为 1.1 秒。

表 4-4 新英格兰 39 节点结果

序数	负荷参数	母线	校正次数	节点类型
1	1.1274	77	1	CEP
2	1.1320	62	1	CEP
3	1.2469	74	2	CEP
4	1.2776	76	2	CEP
5	1.3023	56	2	CEP
6	1.3407	15	2	CEP
7	1.3795	1	2	CEP
8	1.3921	34	2	临界 CEP

下面算例为云南电网硕多岗河梯级水电站实际算例，表 4-5 为算例结果。负荷基值 263.94MW，收敛精度 10^{-6} ，计算时间 0.2 秒，原连续潮流法计算时间为 0.55 秒。

表 4-5 硕多岗河梯级水电站结果

序号	负荷功率	母线	迭代次数	节点类型
1	286.15	11	1	CEP
2	319.40	9	2	CEP
3	337.85	10	2	CEP
4	379.62	8	2	CEP
5	412.88	7	2	临界 CEP

4.5 小结

通过上面算例可以得出以下结论：

- a) 通过直接求取约束变换点，计算时间比传统连续潮流法减少 2/3 以上，大大提高了效率，对于大型系统结果尤为明显；其后对约束变换点类型的做出判断分析，保证了系统的静态稳定特性。
- b) 此算法适用于大中小各种类型的电力系统，具有很强的实用性。通过得到的约束变换点信息可以计算电压稳定指数以及在特定负荷条件下确定何时何地某台发电机将达到它的无功上限，而这些信息对系统的调度员是十分有用的，在实际系统中此算法可以用在输电能力的计算以及安全评估中。

第五章 总结和展望

5.1 本文工作总结

输电能力是表征电力系统稳定性的重要指标，快速、准确模拟系统的运行情况求取系统输电能力是本课题的关键所在。围绕此中心，本文所作的主要工作如下：

1. 对系统输电能力的基本概念及基本的计算方法进行了描述。总结了电力系统领域中应用最广泛的几种连续性潮流计算方法，对局部参数化，弧长参数化方法作了具体分析，针对发电机有功限制，介绍了一种将优化方法与连续性潮流算法相结合确定发电机有功出力的算法。
2. 详细阐述了通过约束变换点求取系统功率极限的基本原理，并对其类型进行静态分析判断，建立了用此方法求解系统最大输电能力的数学模型并进行了公式推导和程序实现。
3. 针对考虑发电机无功出力时，传统算法计算时间过长，提出利用约束变换点求取功率输出极限的改进连续潮流算法，并用IEEE三个实例以及某实际算例对其验证，它的计算时间比传统连续潮流算法大大减少，证实了该方法的可行性和实用性。

5.2 未来工作展望

本文对基于静态电压稳定约束的输电能力的模型建立作了大量研究工作。在3个IEEE实例以及实际电网算例中的应用表明以连续性潮流作为基本分析工具，具有可靠性高，扩展性强的特点，但还有以下几个方面需要继续研究：

1. 进一步完善发电机调度模块的功能。目前连续法求解传输极限所考虑的发电机调度模式仅有比例分配、计划分配、调速器响应三种，对于实际系统来说考虑经济调度、区域发电控制则更具实际意义。
2. 加强对各种FACTS设备模型的研究。随着柔性交流输电技术的发展，各种FACTS设备的应用将越来越广泛，如何计及这部分潮流控制设备的影响将是输电能力研究的重要任务。
3. 开展在线分析研究，满足实时输电能力计算要求。输电能力作为电力系统安

全性与可靠性的重要指标已成为EMS系统分析功能的重要组成部分,开展实时环境下的输电能力研究对保障互联电力系统的安全可靠运行具有重要意义。

参考文献

- [1] North American Electricity Reliability Council, Transmission Transfer Capability: A Reference Documents for Calculating and Reporting the Electric Power Transfer Capability of Interconnected Electric Systems, Technical Report, NERC, 1995.
- [2] North American Electric Reliability Council, Available Transfer Capability Definitions and Determination: A Reference Document prepared by TC Task Force, Technical Report, NERC, 1996.
- [3] G C Ejebe, J Tong, J G Waight, Available Transfer Capability Calculations, IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1521-1527.
- [4] Quada J J, Sackett B, Bulk Power Area Reliability Evaluation Considering Probabilistic Transfer Capability, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 12(9): 3551-3562.
- [5] G L Landgren, S W Anderson, Maximized Transmission Grid Loading Using Linear Programming, IEEE Tutorial Course, 1976.
- [6] Enns M K, Quada J J, Sackett B, Fast Linear Contingency Analysis, IEEE Transactions on Power Apparatus System, 1982, 12(4): 783-791.
- [7] Sauer Peter W, Reinhard Karl E, Overbye Thomas J, Extended Factors for Linear Contingency Analysis, Proceedings of the 34th hawaii international conference on system science, 2001: 697-703.
- [8] Ou Yan, Singh C, Assessment of Available Transfer Capability and Margins, IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [9] Gravener M H, Nwankpa C, Available transfer capability and first order sensitivity, IEEE Transactions On Power Systems, 1999, 14(2): 512-518.
- [10] Chiang H D, A Fluek, K shah, CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations, 1994.
- [11] V Ajjarapu, C Christy, The Continuation Power Flow: A tool for steady state voltage stability analysis, IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [12] Chiang H D, Jean Jumeau Rene, A More Efficient Formulation for Computation of the Maximum Loading Points in Electric Power System, IEEE Transactions on Power System, 1995, 10(1): 635-646.

- [13] 周双喜, 冯治鸿, 杨宁, 大型电力系统 PV 曲线的求取, 电网技术, 1996, 20(8): 4-8.
- [14] 王成山, 李国庆, 余贻鑫等, 电力系统区域间功率交换能力的研究, 电力系统自动化, 1999, 23(3): 23-26.
- [15] De Tuglie, Dicorato M, La Scala M, Scarpellini, Static optimization approach to assess dynamic available transfer capability, IEEE Power Industry Computer Applications Conference May 16-May 21 Sponsored by IEEE Power Engineering Society: 1999, 23(2): 269-277.
- [16] GD Irisani, X Wang, J Tong S, Mokhtari, Maximum Load ability of Power System using Interior Point Non-Linear Optimization Method, IEEE Transactions on Power System, 1997, 12(1): 162-172.
- [17] 丁晓莺, 王锡凡, 最优潮流在电力市场环境下的最新发展, 电力系统自动化, 2002, 26(13): 1-7.
- [18] 刁勤华, Mohamed Shaaban, 倪以信, 运用连续二次规划法计算区域间极限传输容量, 电力系统自动化, 2000, 24(24): 5-8.
- [19] Luo X, Patton A D, Singh C, Real Power transfer capability calculations using multi-layer feed-forward neural networks, IEEE Transactions On Power Systems, 2000, 15(2): 903-908.
- [20] 焦连伟, Mohamed Shaaban, 倪以信, 可用传输容量计算的分层算法研究, 中国电力, 2002, 35(1): 33-36.
- [21] Dai You jie, McCalley J D, Vittal V, Simplification, Expansion and Enhancement of Direct Interior Point Algorithm for Power System Maximum load ability, IEEE Transactions On Power Systems, 2000, 15(3): 1014-1021.
- [22] Greene S, Dobson I, Alvarado F L, Sensitivity of Transfer Capability Margins with a Fast Formula, IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 34-40.
- [23] R Seydel, From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and stability Analysis, New Work, Elsevier, 1988.
- [24] 祝达康, 程号忠, 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法, 电网技术, 1999, 23(4): 36-40.
- [25] 王成山, 李国庆, 江伟, 余贻鑫, 电力系统区域间最大功率交换量的计算, 第十四届全国高校电力系统及其自动化学术年会论文集, 1998. 10.
- [26] 江伟, 基于静态电压稳定的大型互联系统输电能力研究, 天津大学硕士生论文, 2000, 6.
- [27] Lof P A, Voltage Dependent Reactive Power Limits for Voltage Stability Studies, IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 220-228.

- [28] N E Nilsson, J Mercurio, Synchronous Generator Capability Curve Testing and Evaluation, IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 414-424.
- [29] M M Adibi, D P Milanicz, Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines, IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 29-40.
- [30] Ian Dobson, Voltage Collapse Precipitated by the Immediate Change in Stability When Generator Reactive Power Limits are Encountered, IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1992, 39(9): 762-766.
- [31] Voltage Stability of Electric Power Systems, Thierry Van Cutsem, Costas Vournas, Kluwer Academic Publisher, 1998.
- [32] IEEE Task Force, Standard load models for power flow and dynamic performance simulation, IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 1302-1313.
- [33] CIGRE Task Force, Modeling of voltage collapse including dynamic phenomena. CIGRE Publication, 1994.
- [34] L M Hajagos and B Danai, Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies, IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 584-592.
- [35] 于尔铿, 《能量管理系统》, 科学技术出版社, 1998.
- [36] A J Flueck, Advances in Numerical Analysis of Nonlinear Dynamical Systems and the Application to Transfer Capability of Power systems, Dissertation of Ph.D, Cornell University, 1996.
- [37] 范磊, 陈珩, 静态电压稳定分析中发电机的无功功率及其越限处理, 电力系统自动化, 1998, 22(12): 20-23.
- [38] Obadina, Berg G J, Determination of voltage stability limit in multimachine power systems, IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1545-1554.
- [39] Naoto Yorino, Hua Qiang Li, Hiroshi Sasaki, A predictor/corrector scheme for obtaining Q-limit point for power flow studies, IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 130-137.
- [40] 何仰赞, 温增银, 《电力系统分析》, 华中理工大学出版社, 1985.
- [41] 张伯明, 陈寿孙, 《高等电力网络分析》, 清华大学出版社, 1996.
- [42] 余贻鑫, 王成山, 《电力系统稳定性理论与方法》, 科学出版社, 1999.
- [43] 余贻鑫, 《线性系统理论》, 天津大学出版社, 1991.

发表论文和科研情况说明

发表的论文：

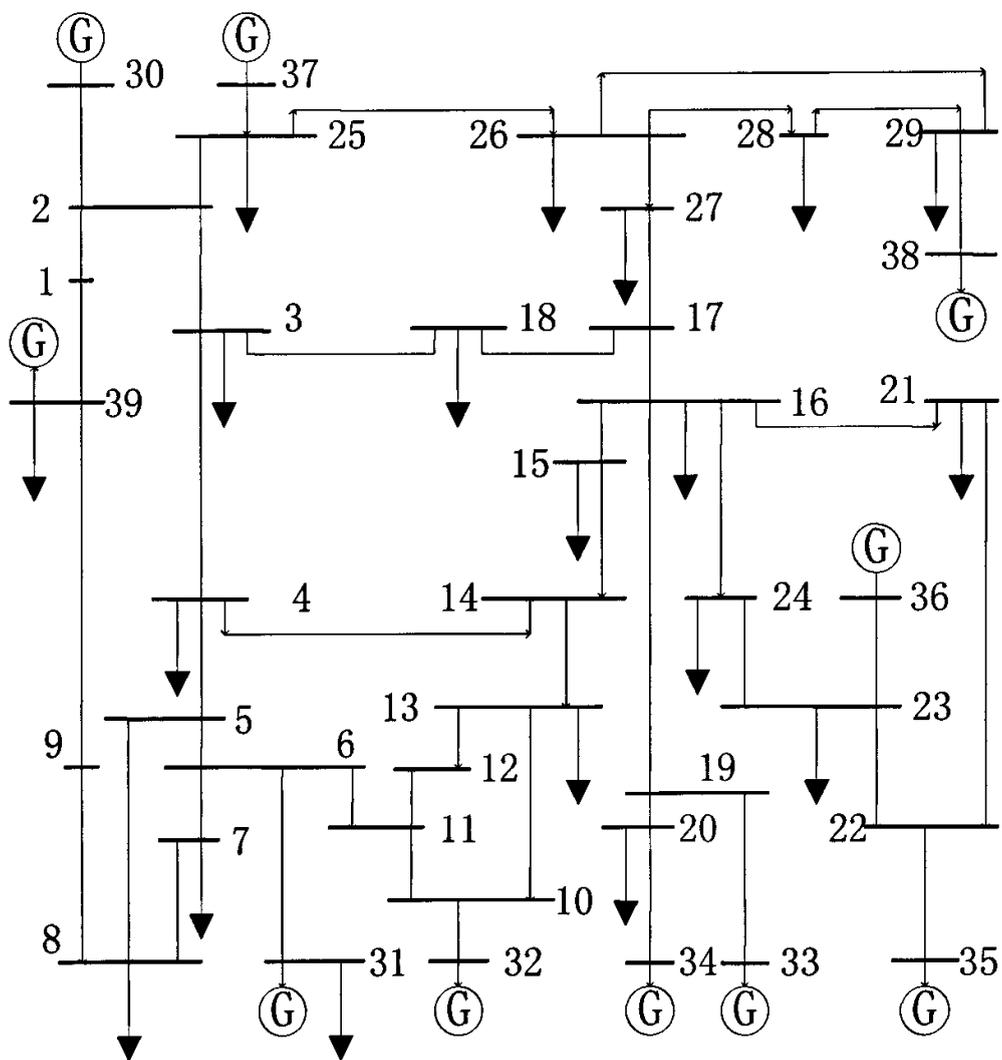
张庆超 李凯峰 谷莹，“基于双向分担的网损分摊方法”，《中国农村水利水电》，（已录用）

参与的科研项目：

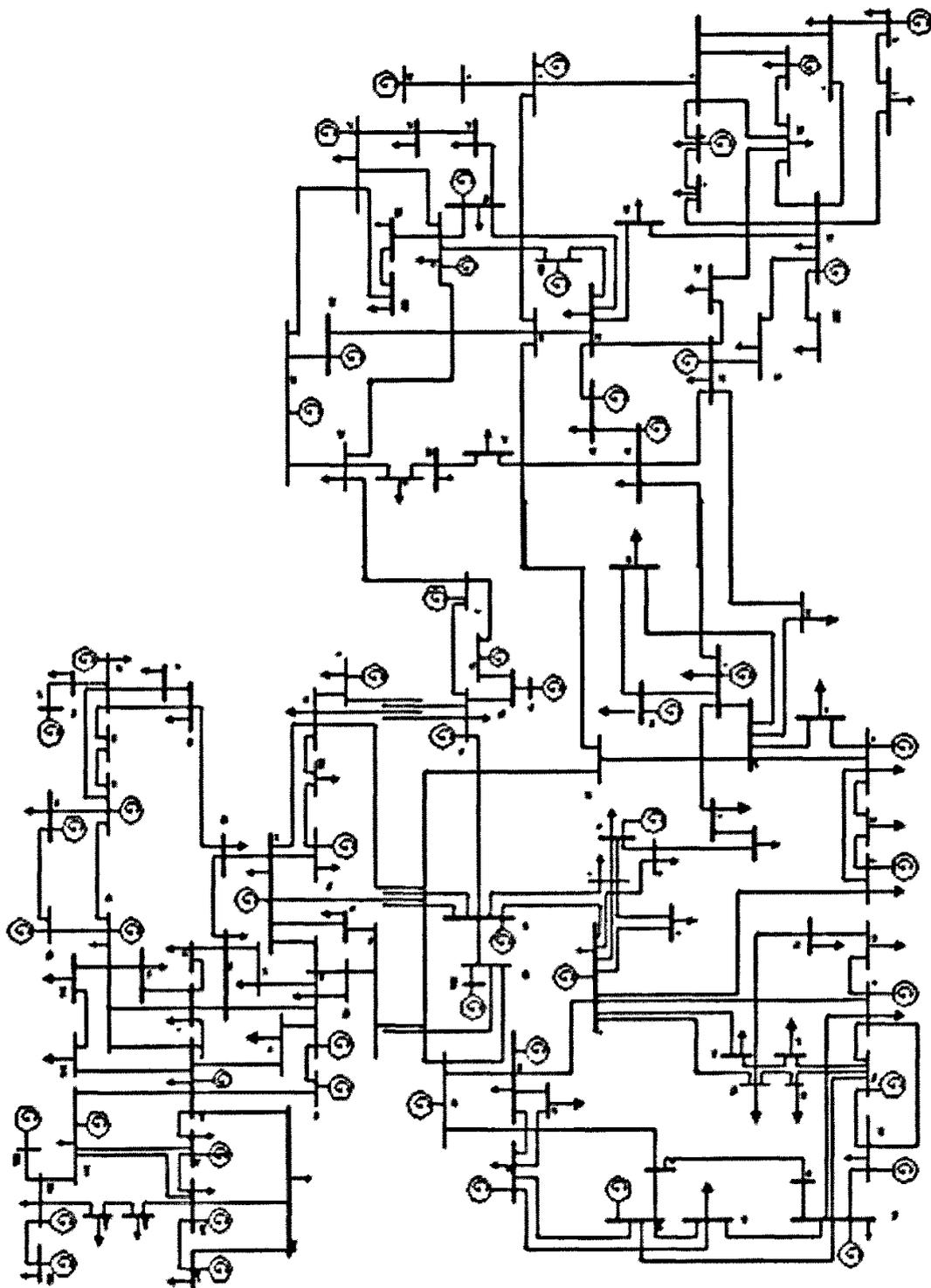
本人参与了云南硕多岗河梯级电站电力送出方式研究。

附录

IEEE39节点网架图:



IEEE118节点网架图:



致 谢

本论文的工作是在我的导师张庆超副教授的悉心指导下完成的，从论文的旋梯、研究计划到论文撰写，无不凝聚着导师的诸多心血。张老师严谨的治学态度，渊博的学术知识，平易近人的作风，正直的为人和谦虚敬业的处世态度，使我收益匪浅，终生难忘。值此论文即将完成之际，谨向导师表示最诚挚的感谢和深深的敬意！

感谢肖玉龙、谷莹、杨占民、姚斌、王振华、杨金非等同窗在实验室工作及撰写论文期间对我的支持和帮助，在此向他们表达我的感激之情。

最后特别感谢我的父母亲，是你们在最紧要的关头给了我动力，没有你们的理解和支持我不可能在学校专心完成我的学业，在此，我忠心祝愿你们身体健康，平安！