

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

THESIS OF BACHELOR



论文题目: 考虑暂态稳定约束的最优潮流研究

学生姓名:	周云
学生学号:	5080309085
专 业:	电气工程与自动化
指导教师:	严正
学院(系):	电子信息与电气工程学院



考虑暂态稳定约束的最优潮流研究

摘要

随着电力工业的发展以及电力市场化改革的逐步推行,现代电网的规模和运行复杂程度 正在显著增加,电力系统越来越需要在接近其稳定极限的方式下运行。市场环境中如何统一 协调考虑系统运行的安全性与经济性成为日益迫切的问题。考虑暂态稳定性约束的最优潮流 (TSOPF-Transient Stability constrained Optimal Power Flow)方法由于可以同时考虑系统的经 济性和动态安全性,成为解决电力系统安全经济运行领域中诸多问题的有效工具,受到人们 的广泛关注。本文基于单机无穷大等效方法(SIME-Single Machine Equivalent),将一般 TSOPF 方法中复杂的动态和暂态约束条件简化为一个单一的稳态约束条件,提出了一种新的、性能 大幅改善的 TSOPF 方法。通过约束条件的简化,TSOPF 问题的复杂性被降低到和传统最优 潮流问题相近的程度。新的方法在保证了准确性的同时也克服了 TSOPF 方法复杂性高的主 要缺点,并使它能更加广泛的应用于实际电力系统中。文中采用基于 IEEE3 机 9 节点经典 测试系统的算例验证了新 TSOPF 方法的有效性。

关键词: 暂态稳定, 最优潮流, 约束条件, 控制算法, 单机无穷大等效



RESEARCH OF OPTIMAL POWER FLOW WITH TRANSIENT STABILITY CONSTRAINTS

ABSTRACT

With the development of the electric power industry and reform of power market, the scale of modern power system and complexity of its operation is increased significantly. Power system needs to be operated in its limit stability point. How to consider both safety and economic efficiency of power system is urgent question to be considered in market environment. As both dynamic security and economic efficiency of power system can be analyzed in the same time by the method of transient stability constrained optimal power flow (TSOPF). TSOPF has become popular and effective tool to solve problems in power system's safety and economic operation. This paper presents a new, significantly improved approach to formulate transient stability constrained optimal power flow, where the sets of dynamic and transient stability constraints to be considered in the optimization process are reduced to one single stability constraint by the single machine equivalent (SIME) method. In this way, the size of the resulting optimization problem is reduced to one very similar to that of a conventional optimal power flow (OPF), overcoming the main drawback of global TSOPF techniques (its huge dimension) while maintaining its accuracy and improving its practical application to real power networks. Numerical examples on the IEEE three-machine, nine-bus system were used to demonstrate the Effectiveness of the new approach.

Key words: transient stability, optimal power flow, constraint condition, control algorithm,

single machine equivalent (SIME) method



|--|

第一章 绪论		1
1.1 论文研究的行	皆景和意义	1
1.2 国内外研究现	见状	2
1.3 本文研究内容	×	3
第二章 考虑暂态稳定	的束最优潮流问题通用模型	5
2.1 最优潮流问题	题	5
2.1.1 最优潮	月流问题的定义	5
2.1.2 最优潮	l流问题研究的意义	5
2.1.3 最优潮	月流模型	5
2.1.4 最优潮	围流模型数学描述	б
2.1.5 最优潮	月流的经典方法	7
2.1.6 最优潮	围流人工智能算法简介	8
2.2 考虑暂态稳定	定约束最优潮流通用模型	9
2.2.1 暂态税	急定约束最优潮流模型描述	9
2.2.2 TSOPF	7模型的稳态约束条件	10
2.2.3 TSOPF	模型的动态约束条件	10
2.2.4 TSOPF	问题模型的暂态约束条件	10
2.3 本章小结		10
第三章 基于单机无穷	了大等效方法的考虑暂态稳定约束的最优潮流问题方法	11
3.1 单机无穷大等	译效方法	11
3.1.1 背景介	绍	11
3.1.2 单机无	穷大等效方法基础	11
3.1.3 单机无	E穷大母线模型描述	11
3.1.4 OMIB	单摆稳定性	12
3.1.5 OMIB	临界和相关机组识别	14
3.1.6 OMIB	多摆现象	14
3.2 基于 SIME 的	J TSOPF 问题模型	15
3.2.1 单机无	已穷大等效方法的使用	15
3.2.2 SIME	灵敏度分析	16
3.2.3 基于 S	IME 的 TSOPF 模型建立	16
3.3 暂态稳定控制]算法	17
3.3.1 暂态税	急定控制算法流程	17
3.3.2 暂态税	急定控制算法流程框图表示	18
3.4 本章小结		19
第四章 考虑暂态稳定	至约束的最优潮流研究算例分析	20
4.1 算例分析环境	旁	20
4.1.1 最优潮	流计算工具	20
4.1.2 时域仿	真软件	20
4.1.3 算例分	析流程	23
4.1.4 经典测	试系统	23



考虑暂态稳定约束最优潮流研究

4.2	IEEE3 机 9 节点测试系统算例 1	
	4.2.1 算例说明	
	4.2.2 算例计算过程	24
	4.2.3 算例结果分析	
4.3	IEEE3 机 9 节点测试系统算例 2	
	4.3.1 算例说明	
	4.3.2 算例计算过程	
	4.3.3 算例结果分析	41
第五章	结论与展望	
谢辞		



第一章 绪论

1.1 论文研究的背景和意义

电力系统已经成为人类社会发展的基础,电力系统的安全和稳定运行关系到整个社会经济的发展和健康成长。多年来电力系统的稳定问题一直受到人们的广泛关注,相关的研究成果不断涌现。近年来,随着科学技术的不断发展和进步,为满足不断增长的能量需求,电力系统的发展有了很多新的变化,电力系统的稳定运行将会面临越来越多的挑战。

首先,由于电力市场的逐步确立和发展,传统电力系统的集中控制逐渐转变为依据市场 信息反馈的分散控制的形式。在电力市场环境下,发电、输电、配电等各个部分出现了许多 追求独立经济利益的电力运营商。这使得电力系统的稳定运行具有了更大的不确定性。另一 方面,这些运营商追求自己最大经济利益的市场行为,也使得系统的运行在考虑安全性的同 时不断向经济性倾斜,机组和输电线路等各种设备的运行更加接近其能力上限,使得整个电 力系统长期重载运行,很容易接近它的稳定极限,更容易诱发电力系统的稳定性问题。

上个世纪 70 年代以来,世界上很多国家相继发生了大规模的电力系统事故,不仅造成 了巨大的经济损失还造成了很大的社会影响。特别是 2003 年 8 月,美国中西、东北电网和 加拿大部分电网所经历的大停电,影响到了至少 5000 万人的日常生活,给美国方面造成了 多达 300 亿美元的经济损失,在加拿大,当月的国内生产总(GDP)下降了 0.7 个百分点。因 此大停电之后,各个国家都更加重视电网的安全问题和稳定运行问题,纷纷将其作为国家战 略安全最重要的一个部分。

我国虽然还没有出现过大范围的电力系统事故,但局部停电事故却时有发生,例如 1972 年7月27日湖北电网, 1986年6月张家口等电网都曾出现过局部停电事故。现在,我国 正处于经济快速发展时期,电力需求和装机容量均快速发展,电力系统也进入了大电网、大 机组、远距离、超高压的时期。研究如何保证电力系统的稳定安全运行是电力系统领域工作 者和研究者将面临的一个重要任务。

上世纪 60 年代初,法国学者 Carpentier 提出了建立在严格数学基础上的电力系统最优 潮流(OPF-Optimal Power Flow)模型。作为经典经济调度理论的延伸,最优潮流模型将经济 性与安全性,有功和无功功率优化相结合。发展到现在,最优潮流已经成为电力系统运行分 析和优化的一种重要工具。所谓最优潮流,就是当电力系统的结构参数及系统负荷确定时, 通过改变系统的可变变量,获得能满足所有的约束条件并使系统的目标性能指标达到最佳的 潮流分布。由于电力系统的状态变量及相关函数的最大最小值间有一定的间隔,系统的控制 变量可以在其一定的范围内调节。因此对于给定的一种负荷情况,理论上电力系统存在多个、 技术满足要求的潮流可行解。每一个潮流可行解都对应于电力系统的一个特定的运行方式, 具有相应的总体性能指标(如系统总的机组燃料消耗量,系统总网损等)。为了优化电力系统 的运行和获得最佳的系统性能指标,有必要从所有的可行潮流解中挑选出一个最佳解,这就 是 OPF 所要解决的问题。最优潮流问题是一个多约束、大规模、非线性的优化问题,通过 对 OPF 的求解,最终达到优化资源、减少输电损耗、降低发电成本、提高系统的输电能力 等目标,它所具有的意义是传统电力系统潮流计算所无法达到的。^[1]

随着电力工业的发展以及电力市场化改革的逐步推行,现代电网的规模和运行复杂程度 正在显著增加,电力系统需要在越来越接近其稳定极限的方式下运行。市场环境中如何统一 协调考虑系统运行的安全性与经济性成为日益迫切的问题。考虑暂态稳定性约束的最优潮流 (TSOPF-Transient Stability constrained Optimal Power Flow)方法由于可以同时考虑系统的经



济性和动态安全性,成为解决电力系统安全经济运行领域中诸多问题的有效工具,受到人们 的广泛关注。在研究电力系统暂态稳定的预防控制问题中首先提出了考虑暂态稳定性约束的 最优潮流问题模型。电力系统的动态安全经济运行领域中的很多技术问题,如暂态稳定性紧 急控制、动态拥塞管理、最大传输容量等实际上都同时涉及到资源优化以及系统运行的暂态 稳定性这两个方面的问题,因而都可描述为 TSOPF 问题。TSOPF 在模型中统一考虑了系统 运行的经济性和系统动态安全性,是对 OPF 的有效延伸和扩展,因而具有更显著的技术经 济意义。^[2]

1.2 国内外研究现状

最优潮流问题是上世纪 60 年代 J. Carpentier 在"含网络约束的经济调度"问题^[4]中提出来 的。研究者们在此后几十年间对最优潮流问题的研究依然保持了强烈的兴趣^{[5]-[10]}。这些研 究主要集中在向 OPF 问题中引入各种高效的优化算法^{[5]-[7]}、考虑如何处理问题中的变压器 可调分接头和如何设置无功功率补偿装置等离散变量^[8]和综合考虑预想故障后系统的静态 电压稳定^[9]和系统预防性安全约束^[10]等。在传统最优潮流问题中,仅仅考虑了节点电压幅值 范围、发电机输出有功(无功)功率限制、输电线路最大传输容量等静态安全稳定约束。但若 系统运行在得到的静态运行点,那么在某些预想故障下系统可能会失去暂态稳定性或者运行 在接近系统的极限暂态稳定点。文献[11]中因此提出了常规最优潮流问题的计算结果能否对 预设关键故障后的同步机组的功角稳定提供控制措施的问题。近年来,考虑暂态稳定约束的 最优潮流问题逐渐引起了越来越多的关注,学者们提出了很多种处理暂态稳定约束的方法 ^{[12]-[17]},同时大量性能良好的优化算法^{[18]-[23]}被引入来求解考虑暂态稳定约束的最优潮流问题。

从数学模型上讲,TSOPF 问题属于面向动态过程的大规模非线性规划问题的范畴。因 为电力系统的暂态过程一般是用高维数的微分代数方程(DAE-Differential Algebraic Equations)描述,因此求解过程中会存在问题维数高、计算量大、求解过程特别复杂的问题。 目前的研究主要集中在如何处理暂态稳定约束条件、怎样引入高性能优化算法和准确筛选大 规模系统多预想故障集等三个方面。以对暂态稳定约束条件的处理方式为分类标准,目前的 研究主要可分为两个类别:基于时域数值仿真的间接方法[12]-[15],[18]-[21]和基于李雅普诺夫暂态 能量函数的直接方法[16],[17],[22],[23]。根据对微分代数方程处理方式的不同,基于时域数值仿真 的间接方法可以进一步细分为函数空间约束转换法[13],[14]、数值离散差分方法[12],[18],[21]和子 问题迭代等其他方法[15],[19],[20]。因为考虑暂态稳定约束的最优潮流问题在一个数学意义上的 属于大规模非线性规划的问题,所以常规的处理非线性优化问题的方法和理论上都可以求解 该问题,如逐次线性规划法^{[12],[21]}、简化梯度法^[24]、原-对偶内点法^{[18],[28]}及其改进算法等高 效优化方法和粒子群算法^[22]、微分进化方法^[23]、遗传算法^[25]等现代智能方法均能成功应用 于 TSOPF 问题的求解。从考虑的问题规模来看,系统的预设故障数目从仅有的一个预想故 障慢慢发展到多个系统预设故障,算例中设计到的电力系统也从开始的小型测试系统发展为 大规模系统甚至大规模实际系统。尽管系统规模很大时,当前对暂态稳定约束条件处理和非 线性优化算法可以使用,但在处理过程中都不同程度的遇到计算耗时过大、额外计算过多等 问题。若为多预想故障的 TSOPF 问题,因为故障数目的增加造成问题规模的不断扩大,求 解过程中遭遇维数灾的可能性也相应增加。另一方面可能在一些预设故障下并不存在暂态稳 定性问题,因此学者们提出了预想故障筛选的各种措施^[26]目的是过滤出最为严重的预设故 障,在考虑最严重预设故障的情况下进行计算。这也是对多预想故障 TSOPF 问题提高其算 法性能的一种尝试。^[3]

对电力系统进行暂态时域仿真研究是电力系统暂态稳定性分析最常用的分析方法之一。 暂态时域仿真研究具有直观、信息量大和对不同的原件模型具有较好的适应性等优点。但是



时域仿真的方法一般计算速度比较慢并且很难定量的给出系统的暂态稳定度^[27]。基于数值 离散方法的考虑暂态稳定约束的最优潮流问题采用了时域仿真过程中的逐步积分(SBSI -Step By Step Integration)思想。它将描述电力系统暂态过程中微分代数方程在暂态研究时间 段内离散化差分方程,然后将这些差分方程和暂态微分状态变量对应的初值方程同时作为常 规最优潮流问题的附加约束条件。工程上,一般将各同步机的功角相对于各时段的惯性中心 (COI-Center Of Inertia)角度不超过某一个特定角度(比如可取±100度)作为暂态稳定能否保 持的判据。在数学上,这是一系列含上下限的不等式约束,然后将这些不等式约束添加到作 为原始最优潮流问题的约束条件中。因此 TSOPF 问题就被转换为含有大量等式约束和不等 式约束在特定目标函数下的大规模优化问题。文献[24]中提出了一种基于非线性规划的在线 动态预防控制(DPC-Dynamic Preventive Control)方法,该方法将动态预防控制视为一个以系 统燃料耗费最小化为目标函数,包含很多等式约束和不等式约束的静态优化问题。其中等式 约束条件主要包括微分代数方程在各时步上通过离散化得到的差分方程。而不等式约束则在 引入了势能边界面(PEBS-Potential Energy Boundary Surface)的概念之后定义了一个包含电 力系统运行轨迹的稳定运行域。文献[12]中时变的电力系统转子摇摆方程和时变的电力网络 潮流约束方程采用定步长差分化,形成的等式约束加入到常规最优潮流问题的等式约束中, 同时采用各时段的发电机功角相对于惯性中心不超过 100 度作为暂态稳定的约束条件考虑 了含功角暂态稳定约束的最优潮流问题。文中采用该方法对两组测试系统进行了测试,证明 了基于数值离散的差分考虑暂态稳定约束的最优潮流问题的可求解性。文献[18]在基于上述 研究提出了基于发电机经典模型和负荷恒阻抗模型的多预设故障 TSOPF 内点算法。文中首 先将用恒阻抗表示负荷,用经典模型表示发电机。通过这样处理,各负荷节点均退化为联络 节点,从而可以消去除发电机内电势节点以外的网络节点。消去相应的网络节点之后,网络 节点的全导纳矩阵被简化为与发电机台数有相同阶数的既约导纳矩阵(RAM-Reduced Admittance Matrix)。因为时变的网络潮流约束不再显式地包含在 TSOPF 问题模型中,系统 的暂态过程可以仅由发电机两阶转子摇摆方程确定。将转子摇摆方程通过隐式梯形法则差分 化并加入到原 OPF 问题的等式约束中,并将各发电机功角相对于 COI 不超过某一角度作为 暂态稳定约束条件加入原 OPF 问题的不等式约束中,采用内点法求解新得到的非线性优化 问题。文中在两个测试系统内考虑了多个预想故障进行测试,证明了多预想故障 TSOPF 问 题采用内点法进行求解的可行性。另外文献[21]对暂态稳定三个不同的常用判据对算法及优 化结果的影响进行了有一定深度的探讨。因为基于数值离散差分的方法需要将暂态过程在所 研究的时间段内按一定的仿真步长进行离散化,增加了很多的变量和约束条件。因此在大规 模电网和多预想故障的差分 TSOPF 问题求解中容易遭遇维数灾的问题。如何减少多预想故 障差分 TSOPF 问题的计算耗时和内存占用量和降低其维数,是 TSOPF 问题进一步的研究方 向。^[3]

1.3 本文研究内容

考虑暂态稳定约束的最优潮流问题的解决主要包括两个步骤:首先为了保证在预设特定 故障下能保证同步发电机保持稳定,暂态稳定问题(Transient Stability-constrained Problem)的 描述可以分为动态约束和暂态稳定约束两个部分。然后动态约束和暂态稳定约束以离散化的 形式加入到最优潮流模型中。通过用普通的求解程序对加入新约束的OPF模型的求解,获得 一个最优的系统运行的平衡点。当电力系统运行在计算获得最优平衡点的情况下,能够保证 系统在预设特定故障下是暂态稳定的。把暂态稳定约束加入最优潮流问题是通过在电力系统 的仿真过程中加入一系列不同的约束方程实现的。和常规的最优潮流问题相比,TSOPF问题 的规模因为计算复杂性的提高和对计算资源要求的增加而呈现出数量级的增长。^{[30]-[33]}



基于系统的暂态轨迹不受暂态稳定控制影响的假设^{[33]-[36]},本文提出了一种基于单机无 穷大等效方法(SIME-Single Machine Equivalent)^[37]在系统初始运行点解决考虑暂态稳定约束 的最优潮流问题。这种方法把多机系统的转子角轨迹转换成一个等效的单机无穷大母线 (OMIB-One Machine Infinite Bus)的单一转子角轨迹。通过等面积法则(EAC-Equal Area Criterion)方法分析转换后的等效单机系统的稳定性可以得到原始多机系统的稳定性^[37]。通 过对等效单机系统的转子角偏移的限制,多机系统的暂态稳定性可以得到有效控制^{[38],[39]}。

通过单机无穷大等效的方法,可以形成由表征多机系统稳态运行点的变量组成的新约束 条件。新的暂态约束条件作为一个初值问题被加入到最优潮流问题的模型中。因此TSOPF 问题中的动态约束和暂态稳定约束被简化为一个与时间独立的稳定约束。相应的考虑暂态稳 定约束的最优潮流的问题的规模也降低到类似常规最优潮流问题的程度。

本文中陈述的稳定限制使我们可以将它的Jacobian和Hessian矩阵自然地融入到常规最 优潮流问题中。这克服了论文[33]-[36]中提到的和暂态约束引出有关约束转录技术的问题和 未完成相应梯度的计算给计算机带来的负担。

本篇论文中提到的解决单摆失稳和多摆失稳的TSOPF问题的新方法,把最优问题的规模 降低到和常规OPF问题相近的程度,并且通过将稳定限制条件加入到最优潮流问题的方法使 得考虑暂态稳定约束的最优潮流问题得到更加实际的应用。



第二章 考虑暂态稳定约束最优潮流问题通用模型

2.1 最优潮流问题

2.1.1 最优潮流问题的定义

最优潮流(OPF-Optimal Power Flow)是指在满足节点功率平衡方程及各种系统变量的约束下,从系统优化运行的角度来调整电力系统中各种控制设备的参数,实现目标函数取最小值的优化过程。最优潮流通常可以分为有功优化和无功优化两种优化问题。其中有功优化目标函数通常是发电费用或发电耗量,而无功优化的目标函数是系统全部的网损。由于最优潮流同时考虑网络的安全性和系统的经济性,因此在电力系统的经济调度、安全运行、电网规划、复杂电力系统的可靠性分析等方面都得到广泛的应用。^[40]

优化潮流的历史最早可以追溯到1920年出现的经济负荷调度问题。20世纪20年代在电力 系统功率调度中等耗量微增率准则(EICC-Equal Incremental Cost Criteria)开始被使用。至今在 一些商用OPF软件中依然考虑EICC准则。现代的经济调度问题可以视为最优潮流问题的简 化,它们都属于优化问题,使某一个目标函数的值取最小。通常经济调度问题尽管关注发电机 组的有功功率的分配,但考虑的约束条件多为潮流功率方程的等式约束。1962年, J.Carpentier 提出了通过非线性规划方法来解决经济分配问题的一种方法^[4],首次引入了系统的电压约束 和其它约束,这种约束条件考虑更加周全的经济调度问题就是OPF问题的雏形。^[40]

2.1.2 最优潮流问题研究的意义

最优潮流将电力系统可靠性和电能质量转化成对应的经济指标,达到降低系统运行成本、 优化资源配置、提高服务质量的最终目标。因此和传统潮流计算相比最优潮流研究具有相当 显著的意义,主要体现在下面两个方面。^[41]

一方面,系统经过潮流计算得到的潮流可行解可以指导系统调度员的操作,保证系统在 可靠、安全、经济的运行方式下运行。具体表现为:首先,当OPF问题的目标函数、约束条 件和控制变量的表达形式确定下来后,通过合适的解法就一定可以求出系统潮流的唯一最优 可行解,计算获得的结果不受系统外界因素的影响。其次,在系统最佳运行方式下通过比较 最优条件和相关数学模型,可以获得系统一些重要的灵敏度信息,如改变一些控制变量的值 或者松弛一些约束条件之后对系统最优解性能的影响度。尽管这些灵敏度信息仅在系统最优 解的附近较为有效,这仍然可以揭示网络参数之间的一些联系。最后,一定的冗余量依然存 在于最优潮流建模过程中,若系统最优解存在于在物理条件不可行的区域,将有助于识别约 束条件中造成不可行解的冲突约束,可以提高系统物理网络的运行可行性提供一些建议和解 决方案。

另一方面,随着电力市场化改革的不断深入,OPF研究的经济价值将不断涌现出来。系统的最优潮流可使系统运行于最优的运行方式下,从而使系统更加稳定、安全和可靠。在系统需要满足的约束条件比较多的时候,OPF可以把它们整合到同一个框架下来进行分析。这既满足了电力系统运行的经济性和安全性的要求,也可以降低发电成本,使电厂与电网、电网与用户之间的矛盾得到缓解。^[41]

2.1.3 最优潮流模型

最优潮流问题在数学上是一个带约束的优化问题,其中主要构成包括变量集合、约束条件和目标函数。^[42]



变量集合:

最优潮流模型中主要有两大部分的变量。首先是控制变量,是可以控制的自变量,通常 包括发电机组的有功/无功出力、移相器抽头位置、可调变压器抽头位置、并联电抗器/电容 器容量。然后是状态变量,是控制变量的因变量,通常包括各节点电压和各支路功率等。

约束条件:

最优潮流考虑的系统约束主要包括:

(1)节点有功功率/无功功率平衡约束。

(2)发电机有功出力上下界约束。

(3)节点电压幅值约束。

(4)支路传输功率约束。

(5)发电机/同步补偿机无功出力上下界约束。

(6)并联电抗器/电容器容量约束。

- (7)移相器抽头位置约束。
- (8)可调变压器抽头位置约束。

对这些约束条件分析之后我们可以发现,从表达式本身看(1)为等式约束,(2)-(7)为不等 式约束。从约束的物理特性而言,(2)和(3)属于状态变量约束,(4)-(8)属于控制变量约束。

目标函数

最优潮流问题可以取很多种目标函数,但最常用的属于以下两种

- 系统运行成本最小。该目标函数表示为火电机组的燃料费用之和取最小。一般单机 的燃料费用一般用发电机的有功出力的多项式表示,通常情况下最高阶取2次保证 OPF问题有良好的收敛性。
- 网络损耗最小。无功优化潮流通常以有功传输损耗最小为目标函数,这样在减少系 统有功损耗的同时,还可以改善系统的电压质量。

2.1.4 最优潮流模型数学描述

当最优潮流问题的以系统总运行成本最小为目标函数时,数学模型描述如下。^[42] 目标函数:

min.∑_{i∈S_G}(a_{2i}P_{Gi}² + a_{1i}P_{Gi} + a_{0i}) 式 2-1
 式中: P_{Gi}为第i台发电机组的有功出力,S_G为发电机组集合,a_{2i}、a_{1i}、a_{0i}为
 用二阶多项式表示发电机组耗量系数的相应多项式系数。

约束条件:

$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$	$i \in S_B$	式 2-2-1
$Q_{Gi} - Q_{Di} + V_i \sum_{j=1}^{n} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$	$i \in S_B$	式 2-2-2
$\underline{P_{Gi}} \le P_{Gi} \le \overline{P_{Gi}}$	$i \in S_G$	式 2-3
$\underline{Q_{Ri}} \le Q_{Ri} \le \overline{Q_{Ri}}$	$i \in S_R$	式 2-4
$\underline{V_i} \leq V_i \leq \overline{V_i}$	$i \in S_B$	式 2-5
		b

 $|\mathbf{P}_{l}| = |\mathbf{P}_{ij}| = |\mathbf{V}_{i}^{2}\mathbf{G}_{ij} - \mathbf{V}_{i}\mathbf{V}_{j} (\mathbf{G}_{ij}\cos\theta_{ij} + \mathbf{B}_{ij}\sin\theta_{ij})| \le \mathbf{P}_{l} \quad l \in S_{l} \quad \exists 2-6$

第6页共48页





在上述模型中式2-2-1和2-2-2为等式约束分别为节点有功和节点无功功率平衡方程,其中S_B为系统节点集合。式2-3、2-4、2-5、2-6为系统技术不等式约束,分别为发电机有功出力限制、无功电源无功出力限制、节点电压限制、线路传输约束。其中S_R为所有无功源集合,S₁为线路集合。

2.1.5 最优潮流的经典方法

最优潮流线性规划法是把 OPF 问题分解为有功功率优化、无功功率优化两个子优化问题。在求解方法上,线性规划方法通常采用逐次线性化或分段线性逼近原始的非线性规划问题,接着利用线性规划算法求解。OPF 的非线性规划方法的特点是约束函数和目标函数都呈现出非线性的特点。属于非线性规划范畴的最优潮流问题,非线性规划的各种解法都用来求解 OPF 问题。OPF 的非线性规划方法因为考虑了电力系统的基本特点,在系统变量的划分、约束条件的处理、有功与无功功率的分解、变量修正方向的决定等方面,都有很多种不同的解决方案。最优潮流的经典方法主要是指基于运筹学范围的传统优化方法,其中几种比较经典的算法有:梯度算法、序列二次规划方法、牛顿法和内点解法。^[43]

2.1.5.1 简化梯度算法

1962年,法国电力公司的著名学者 J.Caipentier 首先提出了建立在严格数学证明基础上的用非线性规划法表示的电力系统最优潮流(OPF)模型。通过调整系统的控制变量,在满足各种规定的安全运行条件(系统约束条件)下,使目标函数的值最小,就可以获得系统的最佳运行方式。1968年 Dommel 和 Tinney 提出的简化梯度法(RG) 是第一个具有实用意义的 OPF 突破性的算法。

建立在牛顿法潮流解法基础上的简化梯度最优潮流算法,通过扩充已有的极坐标形式的 牛顿法潮流计算程序就可以实现。简化梯度最优潮流算法原理简单,程序设计方便。首先是 因为采用最速下降法或梯度法作为系统最优解的搜索方向。最速下降法连续二次迭代过程中 的搜索方向是互相垂直的,因此在向最优点逼近的过程中,迭代点走的是曲折迭代路线。当 目标越接近最优点时,因为锯齿变得越来越小,因此迭代的收敛速度很慢,需要多次迭代才 能获得最优解。简化梯度算法另外一个缺陷是由于通过罚函数处理不等式约束而造成的。罚 因子数值的选择影响算法的收敛速度。如果算法过程中选用了过大的罚因子,这会恶化优化 计算过程中的收敛性。很多改进算法如快速解耦算法在后来不断的被提出用于改进简化梯度 算法。^[44]

2.1.5.2 序列二次规划法

序列二次规划法属于非线性规划算法范畴。二次规划法优化中的目标函数形式是二次实函数,模型中的约束一般为线性约束。拟牛顿法一般为序列二次规划法的主算法,约束通过罚函数处理,不断更新的矩阵用来近似代替系统的二阶海森矩阵。在Kuhn-Tucker方程的二阶信息中因为加入了有约束的拟牛顿法,所以序列二次规划法能保证迭代算法的收敛性是超线性的。在每一次主要迭代过程中无功和有功两个子问题依次被求解。因为 Biggs、Han 和 Powell 的工作,序列二次规划法允许有约束的牛顿方法转化为无约束的牛顿方法。拟牛顿法的收敛性要优于梯度算法,但由于近似海森矩阵并不稀疏,使得拟牛顿法在大型网络面前显得力不从心,限制了它在大型网络中的使用。

二次规划法是二阶的方法,在解决 OPF 问题中有较好的收敛性,能较好地解决耦合的最 优潮流问题。但因为需要计算 Lagrange 函数的二阶偏导数二次规划法的计算量大、计算复 杂。



2.1.5.3 牛顿法

1984年,Sun D. I 提出了 OPF 问题的牛顿算法,因为它的收敛速度是二阶的,因此牛顿法 得到了国内外学者的高度评价并得到较为广泛的使用,成为上世纪 90 年代以来发展最优潮 流程序时比较优秀的算法之一。在牛顿法算法模型中,系统变量不再区分为状态变量或者控 制变量。通过这样的处理,我们便于构造稀疏的海森矩阵,充分利用了电力网络的物理特征 和稀疏矩阵技术,适用于较大规模电力系统的应用。^{[45]-[46]}

牛顿法最优潮流算法优点在于利用了目标函数的二阶导数信息使得算法的收敛速度较快。其次因为牛顿法中海森矩阵的稀疏性,稀疏技术得到充分应用,适合大规模网络的计算。 但牛顿法的弱点是难以有效确定系统的约束集,编程实现比较难,而且对应控制变量的海森 阵对角元易出现小值或零值,这会引起矩阵奇异。另外需要注意引入的 Lagrange 乘子的初 值对迭代计算的稳定性影响大。

2.5.1.4 内点法

1984年,AT&T 贝尔实验室的数学家 Katmarkar 提出了在可行域内部寻优的内点法。1986年,内点法由 Gill 推广到更加广泛的非线性规划领域。寻优迭代过程始终在可行域内进行是内点法的初衷,因此初始迭代点应该在可行域内选取,并在可行域的边界设置"障碍"使迭代点限制在可行域内。但对大规模系统,初始可行点的选取有较大难度。在跟踪中心轨迹内点法中对算法做了改进和优化,只要求在迭代优化过程中拉格朗日乘子和松弛变量满足简单的大于零或小于零的条件就可以不必考虑迭代点一定在可行区域的限制,这样的处理利于简化算法的计算。内点法目前广泛应用于电力系统最优潮流问题,和非线性规划模型的牛顿算法相比,它的计算速度和处理不等式约束的能力均有了相当程度的改善。^{[47]-[49]}

内点法的优点有:(1)数值鲁棒性好;(2)算法迭代次数与系统规模或控制变量的数目关系 不大;(3)没有识别约束集的困难。

内点法的缺点有:(1)原-对偶内点算法的对偶变量初值的选择和障碍参数的修正需要人为给出,不能通过计算获得;(2)需要严格控制迭代步长使得迭代中间变量严格限制在可行域 之内;(3)如何处理离散变量和如何分析优化后灵敏度仍需要后续研究。

2.1.6 最优潮流人工智能算法简介

人工智能(AI-Artificial Intelligence)作为近年来科学体系中一门逐渐兴起的边缘学科,在 从理论发展和在实际应用的过程中,都不断呈现出它强大的生命力。人工智能方法并不从严 格的数学基础出发,在处理非线性和离散性问题显得更加有优势。人工智能方法在电力系统 最优潮流中的应用也得到非常快的发展。AI 算法主要可以分为结构模拟、思维模拟和行为 模拟三个主要类别。^[50]

● 基于结构模拟方法的 OPF-ANN 的应用

人工智能结构模拟方法基于仿生学的观点,从模拟脑的微观结构中的神经细胞的出发, 主要研究神经网络和脑模型的硬件结构,将一系列输入通过神经网络产生输出,系统的输出 是输入的非线性函数,它的值可以通过训练获得,通过改变各神经网元的权重分配获得我们 期望的输出结果。

● 基于思维模拟方法的 OPF-模糊集理论的应用

人工智能思维模拟方法通过研究人脑的心理模型,利用符号推演与心理学方法和计算机 软件等方法工具,学习、推理、搜索等功能的实现是通过将待研究的问题或知识用逻辑网络 表示。人工智能思维模拟方法擅长模拟人脑逻辑思维的过程,模拟实现人脑的高级认知功能。 模糊集理论通过思维模拟,在电力系统最优潮流中得到越来越广泛的应用。

在 OPF 计算中,负荷、机组出力、节点电压约束等都属于不确定性因素。这些不确定

考虑暂态稳定约束最优潮流研究

上海交通大學 Shanghai Jiao Tong University

因素都可以通过模糊集理论很好的进行描述。另外相互冲突的多目标优化问题也适合采用模 糊集理论求解,模糊集理论为解决这类问题提供了新途径。

在模糊 OPF 问题研究过程中,首先出现的是直流模糊潮流模型。其中负荷和发电量的 不确定性都用模糊量进行表示,系统的控制变量取发电机组的有功功率输出。交流模糊潮流 模型逐渐被发展。在模型约束的处理过程中,最优潮流问题的约束分为可以适当越限的软约 束和不可越限的硬约束。利用模糊集理论模糊化软约束和目标函数,就可以得到模糊 OPF 问题。

● 基于行为模拟方法的 OPF-进化方法的应用

人工智能行为模拟方法是基于感知-行为模型的智能化方法。通过模拟人在控制过程中的活动和行为,比如自学习、自适应、自组织、自寻优等,来实现人工智能方法。进化方法属于行为模拟的范畴,行为模拟方法主要包括模拟进化算法、模拟退火算法等。

模拟进化算法

模拟进化方法是通过对适者生存、优胜劣汰的自然进化现象的模拟得到的一类随机或自适应的智能优化方法。遗传算法(GA)、进化规划(EP)和进化策略(ES) 是主要的 3 种模拟进 化方法。这 3 种方法都是基于遗传机制和自然选择的启发式搜索,在进化中,能力强和适应 性强的个体存活下来,它们的优良基因遗传给后代,全局范围内模拟进化方法都有稳定的收 敛性。

模拟退火算法

模拟退火算法思想来源于冶炼过程中对金属加温融化再降温的退火过程,可以视为一种 进化优化方法,属于通用启发式随机搜索方法。算法原理简单,通过对常规的迭代寻优算法 进的修正,允许一定的概率接受比上次迭代解稍差的解作为当前迭代过程的解。

2.2 考虑暂态稳定约束最优潮流通用模型

近年来,考虑电力系统暂态稳定约束的最优潮流问题己引起了学术界和工程界的广泛关注,成为电力系统暂态稳定预防控制和优化的一个重要研究方向。

2.2.1 暂态稳定约束最优潮流模型描述

为简化问题的描述,我们仅考虑单一故障的情况。 t_0 为故障发生时刻, t_{cl} 为故障切除时间, t_{end} 为时域仿真结束时间。在T = (t_0 , t_{cl}] U (t_{cl} , t_{end}]的暂态过程研究时间段内,TSOPF问题描述如下。

目标函数:

 $f(x(t), y(t), u) \tag{1}$

约束条件:

1) 稳态约束条件(Pre-disturbance steady-state constraints)

 $\begin{aligned} &G^{t_0}(y^{t_0}, u) = 0, \qquad &I^{t_0}(x^{t_0}) = 0 \qquad (2) \\ &H^{t_0}(y^{t_0}, u) \leq 0, \qquad &u \leq u \leq \overline{u} \qquad (3) \end{aligned}$

2) 动态约束条件(Dynamic-state constraints)

 $\dot{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{u}) = 0, \quad \forall t \in \mathbf{T} \quad (4)$

$$G(x(t), y(t), u) = 0, \qquad \forall t \in T \quad (5)$$

$$x(t_0) = x^{t_0}, y(t_0) = y^{t_0}$$
(6)

3) 暂态约束条件(Transient stability constraints)

 $H(x(t), y(t), u) \le 0, \qquad \forall t \in T \quad (7)$



其中u $\in \mathbb{R}^{n_u}$ 是系统控制变量的矢量集合, \overline{u} 和<u>u</u>分别为矢量 u 的上下限。系统暂态时间 段内的状态变量和代数变量分别用x(t) $\in \mathbb{R}^{n_x}$ 和y(t) $\in \mathbb{R}^{n_y}$ 表述。变量相应的稳态值或者暂态 过程初始值用x^{t₀} $\in \mathbb{R}^{n_x}$ 和y^{t₀} $\in \mathbb{R}^{n_y}$ 表示。通过解式(1)-(7)描述的 TSOPF 问题,我们在满足约 束条件 1)、2)和 3)的前提下, 在系统的可行域内找到了一个系统可行运行点使模型的目标函 数f(·): $\mathbb{R}^{n_x+n_y+n_z} \to \mathbb{R}$ 取得最小值。

2.2.2 TSOPF 模型的稳态约束条件

暂态稳定约束最优潮流问题模型的稳态约束条件(2)和(3)分别为稳态节点功率方程 $G^{t_0}(\cdot): R^{(n_y+n_u)} \rightarrow R^{n_y}、系统初始状态方程I^{t_0}(\cdot): R^{(n_x+n_y)} \rightarrow R^{n_x}、系统物理和运行限制$ $H^{t_0}(\cdot): R^{(n_y+n_u)} \rightarrow R^{nH^{t_0}}$ 和系统控制变量 u。

2.2.3 TSOPF 模型的动态约束条件

暂态稳定约束最优潮流问题模型的动态约束条件(4)和(5)由一组微分代数方程 (DAEs-Differential Algebraic Equations)组成,分别是旋转方程 $F(\cdot)$: $R^{n_x+n_y+n_u} \times T \rightarrow R^{n_x}$ 和节 点功率方程 $G(\cdot)$: $R^{(n_x+n_y+n_u)} \times T \rightarrow R^{n_y}$ 。微分代数方程组成的限制条件必须以代数的形式加 入 OPF 问题的表达式中。因此式(4)用梯形积分法则(Trapezoidal Rule)转换成等效的数值差分 方程。因为在选定的积分区间 T 每个积分步长 Δ t中,这些微分代数方程限制均需要满足,因 此 TSOPF 问题模型中需要考虑的微分代数方程限制的个数等于最优化过程的暂态时间段中 离散间隔的数目。

2.2.4 TSOPF 问题模型的暂态约束条件

暂态稳定约束最优潮流问题模型的暂态约束 $H(x(t), y(t), u)R^{(n_x+n_y+n_u)} \times T \rightarrow R^{n_H}$ 是保证系统在经历预设故障时能保证系统暂态稳定。在选定的积分区间T每个积分步长 Δ t中若式(7)均满足,则可以认为系统保持暂态稳定。

2.3 本章小结

本章介绍了考虑暂态稳定约束的最优潮流问题的通用模型。首先从最优潮流问题的定义、研究意义、模型、数学描述和解决方法等对最优潮流问题进行了描述。然后介绍了 TSOPF 问题的通用模型,先阐述了 TSOPF 问题的数学模型,接着对模型中涉及到的各种约束条件分别作了描述。



第三章 基于单机无穷大等效方法(SIME)的考虑暂态稳定约

束的最优潮流问题方法

3.1 单机无穷大等效方法(SIME-Single Machine Equivalent)

3.1.1 背景介绍

电力系统暂态稳定问题是电力系统规划和运营调度研究的一个部分。暂态稳定问题关系 的是一个具体系统在收到若干干扰是能够保持继续持续运行的能力。

基于时域数值积分的暂态稳定分析是常规的、被大家广泛接受的分析方法之一。时域数 值积分方法的优点是能够应用于所有的电力系统模型和在时域积分的过程中对系统发生的 物理现象有详细的描述。但这种方法主要的弱点是缺少灵敏度和控制信息,同时给予时域数 值积分的方法对计算有很高的要求,尽管最近几年内计算机的性能有很大的发展和提高。

为了克服上述缺点,上世纪 60 年代早期开始,以 Lyapunov 方法为代表的直接法渐渐被 提出。80 年代中期,有学者提出另一种基于等面积法则(EAC-Equal Area Criterion)的直接分 析方法。最近,基于 Lyapunov-like 的混合方法得到了很大的发展。单机无穷大等效方法(SIME) 也是一种混合的时域直接方法。简要的说,SIME 方法是基于时域仿真方法的同时通过等面 积法则获得时域仿真的终止条件和计算系统的稳定极限。

更加详细的说,SIME 方法用一个单机无穷大母线系统代替了含有多台发电机的电力系统。步骤如下:(i)按照著名的等面积法则,对多机系统进行较短时间的时域仿真。(ii)计算相应情况的稳定裕量。(iii)通过计算相继的稳定裕量评价相应的稳定极限(临界切除时间或者功率极限)。一方面,SIME 方法和时域仿真方法相比在计算时间上有本质上的减少。另一方面,这种方法在评价了稳定裕量的同时鉴别出多机系统发电机组中的临界机组。这些获得的信息将在后续的系统分析、灵敏度分析、控制方法等方面得到应用。

3.1.2 单机无穷大等效方法(SIME)基础

SIME 的方法基于以下两点假设

假设1:无论多么复杂,电力系统失步的现象源于系统内所有机组被不可改变的分离为两个群体。因此,多机系统的暂态稳定现象可以用一个合适的、经过选择的单机无穷大母线 (OMIB-One Machine Infinite Bus)来表示。

假设2: 单机无穷大母线的暂态稳定性通过暂态稳定裕量η表示,定义为减速能量超过加速能量的部分。

值得注意的是,以上两个假设同样适用于等面积法则(EAC)。和SIME相比,EAC方法 适用于更加简化的经典模型。同时我们也必须注意到SIME方法和时域仿真方法同样的适用 和准确。

3.1.3 单机无穷大母线(OMIB)模型描述

3.1.3.1 OMIB 模型步骤

将多机系统表述成单机无穷大母线模型的步骤包括:(i)把多机系统中的发电机组分为 两个发电机群。(ii)分别将两个发电机群等效为一个等效的发电机组。(iii)用一个等效的单机 无穷大母线模型替换上一步等效的两个等效发电机组。





3.1.3.2 OMIB 模型参数

一个 n 机系统中的第 i 台机组的相应参数表示如下:

 δ_i(ω_i)
 转子角度(角速度)

 P_{mi}(P_{ei})
 发电机组输入机械(输出电磁)功率

 P_{ai}(= P_{mi} - P_{ei})
 发电机组加速功率

 M_i
 发电机组惯性系数

为了得到一个单机无穷大母线模型,我们要把系统中的发电机组分为两个机群,R和 B,并按以下步骤进行操作。

(i) 利用相应机群的惯性中心角度,将两个机群分别等效为相应的等效发电机组。 以机群 R 为例。

 $δ_R ≜ M_R^{-1} Σ_{k ∈ R} M_k \delta_k$ 其中 $M_R = Σ_{k ∈ R} M_k$ 式 3-1
相似的对机群 B 做相应等效。

(ii) 通过下式将步骤(i)中两个等效的发电机组等效为一个单一的单机无穷大母线模型。

$$\delta \triangleq \delta_{\rm R} - \delta_{\rm B}$$

式 3-2

(iii) 定义等效的单机无穷大母线模型的机械功率

 $P_m = M(M_R^{-1}\sum_{k \in R} P_{mk} - M_B^{-1}\sum_{j \in B} P_{mj})$ 式 3-3 其中M = $M_B M_R / (M_B + M_R)$ 是等效的 OMIB 模型的惯性系数。OMIB 模型的电 磁功率P_e有着类似的表达形式。注意到所有发电机组的P_{mi}和P_{ei}都独立于所有的 简化假设,因此等效之后的P_m和P_e也保持了相应的独立性。

3.1.3.3 OMIB 动态模型

等效的单机无穷大母线的运动方程为:

 $M\ddot{\delta} = M\dot{\omega} = P_m - P_e = P$

式 3-4

式 3-4 描述了 OMIB 的动态模型,是等效模型的运动方程。图 3-1 描述了一个 OMIB 模型的功率、功角变化情况。(a)和(b)两图分别表示了不稳定和稳定的两种情况。



3.1.4 OMIB 单摆稳定性

3.1.4.1 通过等面积法则判断功率-功角稳定性

著名的等面积法则被运用到式 3-4 分析系统的暂态稳定性并通过下式计算系统的暂态 稳定裕量。

 $\eta = A_{dec} - A_{acc}$

式 3-5

注:时 3-5 中 Adec对应图 3-1 中的减速面积,相应的Aacc对应图中的加速面积。

当我们获得系统的稳定裕量 η 之后,可以根据 η 值判断系统的暂态稳定性。若 $\eta < 0$,则 认为系统是暂态稳定的,相应的若 $\eta > 0$ 则认为系统暂态不稳定。当 $\eta = 0$,则系统处于暂态



稳定的临界情况,对应故障的临界切除时间或者系统最大功率。

图 3-1 中加速面积Aacc和减速面积Adec及稳定裕量n计算公式如下。

注意到P_{mD}(P_{mP})是系统暂态过程中的机械输入(电磁输出)功率,通常情况下,P_{mD}和P_{mP}的值随着时间的变化而变化。相似的,P_{eD}和P_{eP}随着δ按非正弦的形式变化。

3.1.4.2 OMIB 时域轨迹的暂态稳定标准

上面描述的功率-功角不稳定(稳定)规则一样适用于单机无穷大母线系统(转子、功角、 角速度、加速功率等)。稳定(不稳定)OMIB 轨迹的判断标准如下。

不稳定轨迹:一个单机无穷大系统轨迹在 $t_u(\delta_u)$ 时若满足 $P_a(t_u) = 0 \pi \frac{dP_a}{dt} | t = t_u > 0$ 且 当 $t > t_0$ 时满足 $\omega(t) > 0(t_0 = t(\delta = \delta_0)), 则这个单机无穷大轨迹为不稳定情况。其中<math>t_u$ 为系 统不稳定时刻, δ_u 是不稳定时刻对应的不稳定功角值。

稳定轨迹:一个单机无穷大系统轨迹在 t_r 时刻($\omega(t_r)=0$)满足 $\delta_r(\delta_r < \delta_u$)和 $P_a(t_r) \equiv P_{ar} < 0$ 且当 $t_r > t > t_0$ 时w(t) > 0,则这个单机无穷大轨迹为稳定情况。其中 t_r 为返回时刻(稳定时刻), δ_r 为返回功角(稳定功角)。

极限稳定(不稳定)情况:一个单机无穷大系统轨迹在 t_a 时刻($P_a(t_a) = 0$)达到返回功角 δ_r 条件,则为极限稳定(不稳定)情况。或者从另一个方面定义,当 t_u 时刻($\omega(t_u) = 0$)达到不稳定功角则为极限情况,或者简单的说当返回功角 δ_r 和不稳定功角 δ_u 相等时则为极限情况,其中 δ_u 称为极限不稳定功角。

3.1.4.3 OMIB 稳定(不稳定)裕量的解析表达式

$$M\ddot{\delta} = P_a\dot{\delta} \qquad \qquad \vec{\pi} 3-9$$

或者

$$\frac{1}{2}M\omega^{2} = \int_{\delta_{0}}^{\delta} P_{a} d\delta = \int_{\delta_{0}}^{\delta_{e}} P_{a} d\delta + \int_{\delta_{e}}^{\delta} P_{a} d\delta \qquad \qquad \vec{\mathbb{R}} 3-10$$

不稳定裕量:

将 $\delta = \delta_u$ 带入式 3-10 并与式 3-8 比较得到不稳定裕量的计算公式如下:

其中 U 表示不稳定轨迹(Unstable trajectory)和 $\omega_u = \omega(\delta = \delta_u)$ 。

● 稳定裕量:

将 $\delta = \delta_r$ 带入式 3-10 并观察到 $\delta = \delta_r, \omega_r = 0$, 我们得到:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_e} (P_{eD} - P_{mD}) \, \mathrm{d}\delta + \int_{\delta_e}^{\delta_r} (P_{eP} - P_{mP}) \, \mathrm{d}\delta = 0 \qquad \text{ } \vec{\mathrm{X}} \text{ } 3\text{-}12$$

$$\eta_{St} = -\int_{\delta_r}^{\delta_u} (P_{mP} - P_{eP}) \ d\delta \qquad \qquad \ \ \vec{\varkappa} \ 3-13$$

其中 St 表示稳定轨迹(Stable trajectory)。

第 13 页 共 48 页

上海交通大学

3.1.5 OMIB 临界(Critical)和相关(Relevant)机组识别

上面几节详细的介绍了一个单机无穷大母线系统(OMIB)的稳定特性,但对于单机无穷 大等效方法(SIME),如何获得和鉴定一个等效的 OMIB 模型是重要的。

等效的 OMIB 模型的获得将通过下面两个步骤获得:

(i)通过临界机组排序方法(Critical machine ranking method),确定候选的 OMIB 模型。 (ii)通过间隔准则(Gap criterion),确定实际 OMIB 模型。

3.1.5.1 临界机组排序 (CMR-Critical Machine Ranking)方法 临界机组排序(CMR)方法基于以下观察:

● 当一个系统中的两台发电机组明显的失去同步之后(例如两者的功角差大于360°)

- 是观察分析整个系统失步现象的好时刻,定义观察时刻为t_{obs}。
- 在t_{obs}时刻,同步发电机的功角值越大则其不稳定程度越高。

因此,对于一个给定的稳定分析方案,CMR 方法通过下列步骤确定(n-1)个候选的相关 机群。

- (i) 考虑几种不同的故障情况(在系统可承受的稳定极限范围内)
- 采用逐点计算的时域仿真程序对系统中的同步机功角进行时域仿真计算,到达 t_{obs}时停止仿真。按照t_{obs}时刻发电机功角的大小从大到小对同步发电机进行排 序。
- (iii) 判断(n-1)个候选相关机群。一般的,功角最大的一台机器,最大的两台,..., 最大的(n-1)台。

3.1.5.2 间隔准则 (Gap Criterion)

当我们利用临界机组排序方法获得故障情况下按功角排序的发电机组后,我们计算相邻 两台发电机组之间的功角间隔,其中功角间隔中的最大值定义为最大间隔。最大间隔以上的 发电机组则为 OMIB 模型中的相关机群(Relevant machine)。最大间隔以下的发电机组则为 OMIB 模型中的其它机群(Other machine)。



图 3-2(b) 稳定情况

图 3-2(a)和 3-2(b)分别是一种稳定情况和一种不稳的情况下系统发电机组的相关机群和 其它机群的划分情况。

3.1.6 OMIB 多摆现象(Multi-swing phenomena)

图 3-2(a) 不稳定情况

由于 OMIB 模型的考虑,多摆现象以及相应的摆动数量均有了明确的定义。一个 m(m>1) 摆稳定(不稳定)现象的出现是因为 OMIB 模型的功角值在前(m-1)摆内没有满足不稳定功角 δ_u(稳定功角δ_r)的条件。在第 m 摆内:

● 达到稳定功角的条件,系统稳定



● 达到不稳定功角的条件,系统不稳定

同时我们需要注意,临界机组排序方法和间隔准则同样适用于多摆的情况。式 3-8 中裕量计算公式同样适用于多摆情况,多摆情况计算式如下:

$$\eta = -\int_{\delta'_a}^{\delta'_a} P_a \, d\delta$$

式 3-14

其中δ'₀(δ'_u)是第 m 摆的初始(不稳定)OMIB 模型的功角。

3.2 基于 SIME 的 TSOPF 问题模型

3.2.1 单机无穷大等效(SIME)方法的使用

上文介绍的 SIME 方法将多机电力系统转化为一个等效的单机无穷大母线(OMIB)模型。 首先按照临界机组排序方法和间隔准则将多机分为相关机群和剩余机群两个部分,我们也可 以将相关机群称为临界机群 (CMs-Critical Machines),剩余机群称为非临界机群 (NMs-Noncritical Machines),然后分别将两个机群等效为相应的等效机组,最后再将两个机 群的等效机组再次进行等效完成单机无穷大母线模型的构建。^[29]

等效过程中涉及到的主要公式如下:

$M_{C} = \sum_{k \in C} M_{k}$	式 3-15
$M_N = \sum_{j \in N} M_j$	式 3-16
$\delta_{C}(t) = (M_{C})^{-1} \sum_{k \in C} \delta_{k}(t) M_{k}$	式 3-17
$\omega_{C}(t) = (M_{C})^{-1} \sum_{k \in C} \omega_{k}(t) M_{k}$	式 3-18
$\delta_N(t) = (M_N)^{-1} \sum_{j \in N} \delta_j(t) M_j$	式 3-19
$\omega_{\rm N}(t) = (M_{\rm N})^{-1} \sum_{j \in {\rm N}} \omega_j(t) M_j$	式 3-20

式 3-15~式 3-20 完成了临界机群和非临界机群的等效。其中 C 为临界机群集合, N 为 非临界机群集合, M 是相应同步机组的惯性系数。

$\delta(t) = \delta_{\rm C}(t) - \delta_{\rm N}(t)$	式 3-21
$\omega(t) = \omega_{\rm C}(t) - \omega_{\rm N}(t)$	式 3-22
$M = \frac{M_C M_N}{M_C + M_N}$	式 3-23
$D(t) = M[M^{-1}\Sigma D(t) (M)^{-1}\Sigma D(t)]$	₹ 2 24

$$P_{e}(t) = M[M_{c} + \sum_{k \in C} P_{ek}(t) - (M_{N}) + \sum_{j \in N} P_{ej}(t)] \qquad x_{i} \quad 3-24$$

 $P_{m}(t) = M[M_{c}^{-1}\sum_{k \in C} P_{mk}(t) - (M_{N})^{-1}\sum_{j \in N} P_{mj}(t)]$ 式 3-25 式 3-21~式 3-25 完成了单机无穷大母线(OMIB)模型的构建,其中 $P_{e}(t)$ 和 $P_{m}(t)$ 是 OMIB

模型中的电磁输出功率和机械输入功率。

不稳定情况下我们利用下式计算不稳定裕:

$$\eta_{\rm u} = -M(\omega(t_{\rm u}))^2/2$$

式 3-26



图 3-3

同时对于稳定情况,如图 3-3 所示,我们对式 3-13 进行近似处理用三角形面积代替积

第 15 页 共 48 页



分面积得到稳定裕量的计算公式,公式如下: $\eta_{st} = |P_a(t_r)|(\delta(t_u) - \delta(t_r))/2$

式 3-27

3.2.2 SIME 灵敏度分析(Sensitivity Analysis)

单机无穷大的灵敏度分析定量的分析了系统的暂态稳定(不稳定)裕量η与选定的灵敏度 参数 p_s 的变化关系。非常多的算例说明 OMIB 的不稳定裕量 η_u 与暂态过程中故障切除时间 $p_s = t_{cl}$ 或者模型的等效机械功率 $p_s = P_m(t_0)$ 存在近似线性(Quasi-linear)关系。通过对灵敏度 参数 P_s 的调节可以改善系统的暂态不稳定程度或者系统由暂态不稳定转变为暂态稳定的情况。



图 3-4

图 3-4 表示一个 OMIB 模型的的暂态不稳定(稳定)裕量η,在故障切除时间 t_{cl} 固定的情况下,与 t_{ctrl} 时刻的 OMIB 模型的功角 δ_{ctrl} 存在近似线性关系。 t_{ctrl} 可以选择暂态过程研究时间段T = [t_0 , t_{end}]内的一个时刻。我们可以利用 η 和 δ_{ctr1} 的近似线性关系,暂态稳定极限可以作为灵敏度参数P_s = δ_{ctrl} 的函数,通过利用过灵敏度系数S_k(t_{ctrl}) = ($\Delta\eta/\Delta p_s$)| t_{ctrl} 进行线性内插(外插)过程可以计算出系统在预设故障下的暂态稳定极限。

灵敏度系数的使用是在获得两个系统有效运行点(η_{k-1},δ_{k-1}(t_{ctrl}))和(η_k,δ_k(t_{ctrl}))之后 利用线性关系进行的。但计算过程中下面两个条件必须满足:(i)δ_{k-1}(t_{ctrl})和δ_k(t_{ctrl})必须对 应时域仿真中的同一时刻。(ii)两种情况下系统的 OMIB 模型必须有相同的失稳模式(都在第 m 摆内达到失稳条件)。

第 k 次成功的线性内插(外插)的裕量灵敏度值S_k(t_{ctrl})的计算公式如下:

根据式 3-28, 使得系统暂态裕量 $\eta_k = 0$ 的 OMIB 模型期望的功角偏差的计算公式如下:

3.2.3 基于 SIME 的 TSOPF 模型建立

推荐的 TSOPF 模型如下:

目标函数:

目标函数是系统运行成本最小,也即发电机组燃料费用之和去最小。其中N_g为发电机 集合。a_i、b_i、c_i是发电机组的费用曲线的系数,P_{mi}是发电机组的输入机械功率。

第 16 页 共 48 页



约束条件:

(1)节点功率方程

$$G^{t_0}(\cdot) = \begin{pmatrix} P_{mi}^{t_0} - P_{li}^{t_0} - \sum_{j \in i} P_{inj \ ij}^{t_0} = 0 \\ Q_{gi}^{t_0} - Q_{li}^{t_0} - \sum_{j \in i} Q_{inj \ ij}^{t_0} = 0 \end{pmatrix} \qquad i = 1, 2, ..., N_b \qquad \ \vec{x}_{b} 3-31$$

其中N_b是系统节点集合,Q^{to}_{ei}是节点计划无功功率。节点有功、无功负载分别用P^{to}_{li}和Q^{to}_{li}

表示。P_{ini ii}和Q^{to}_{ini ii}是与节点 i 相连的联络线注入节点 i 的有功和无功功率。

(2)初始条件方程

发电机采用经典模型,考虑同步机组的机端电势 E_j 、d 轴暂态电抗 X'_{di} 、同步机组功角 $\delta_i^{t_0}$ 和角速度 $\omega_i^{t_0}$,表征变量之间关系的初始条件方程如下:

$$I^{t_{0}}(\cdot) = \begin{pmatrix} E_{i}V_{i}^{t_{0}}\sin(\delta_{i}^{t_{0}} - \theta_{i}^{t_{0}}) - X_{di}' P_{mi}^{t_{0}} = 0\\ E_{i}V_{i}^{t_{0}}\cos(\theta_{i}^{t_{0}} - \delta_{i}^{t_{0}}) - (V_{i}^{t_{0}})^{2} - X_{di}' Q_{gi}^{t_{0}} = 0 \end{pmatrix}$$

to I_{i} $I_{$

其中 $\omega_i^{t_0} = \omega_s, i = 1, 2, ..., N_g$ 。

(3)物理和运行限制

其中 $i = 1, 2, ..., N_g$ $j = 1, 2, ..., N_b$

式 3-33 为发电机有功出力限制和节点电压限制,式 3-34 为发电机输入机械功率限制。 (3)暂态约束

根据 SIME 灵敏度分析,我们取 $t_{ctrl} = t_0$,在 t_0 时刻对 OMIB 模型的功角偏差进行限制。 暂态约束条件如下:

H(·) = abs({ $\delta_{C}(t_{0}) - \delta_{N}(t_{0})$ } - $\delta_{sh}(t_{0})$) - T_h ≤ 0 式 3-35 其中T_h为一个趋于 0 的正数,例如可以取10⁻⁴。

3.3 暂态稳定控制算法

系统故障的稳定通过迭代计算保证。当通过 TSOPF 模型,在第 n 次迭代计算出的系统运行点IPⁿ的稳定裕量随着迭代次数的增加而获得改善。新计算出的系统运行点IPⁿ⁺¹将通过 基于单机无穷大等效方法的稳定分析法判断系统稳定性。只要系统非稳定,我们都要计算出 一个新的δ_{sh}(t₀)更新式 3-35 中的暂态限制,新的暂态限制将加入下次 TSOPF 迭代计算的限 制条件中。^[29]

3.3.1 暂态稳定控制算法流程

具体的暂态稳定控制算法具体流程如下:

Step1:通过常规最优潮流的计算即不考虑暂态约束条件,得到系统运行初始点 ${\rm IP}^{0}$ 。

Step2:按系统预想故障情况,以IP⁰为初始点进行时域仿真,利用 OMIB 进行稳定性分析:

1)如果系统稳定,则跳转 Step8。

2)若系统不稳定,则计算系统的不稳定裕量 η_U 和 OMIB 模型初始的功角偏差 $\delta_{UT}^{t_0}$ 。得到 ($\delta_{UT}^{t_0}$, η_U) , 跳转 Step3。



Step3:通过 $\delta_{sh} = (1 - \lambda)\delta_{UT}^{t_0}$ 计算出 OMIB 模型期望的新的初始功角偏差 $\delta_{UT}^{t_0}$ 。 λ 表示在 t_0 时刻

对 $\delta_{UT}^{t_0}$ 的一个较小的递减百分比。通常情况下 λ 取 0.1,但在 Step5 或者 Step6 中 λ 的值可能发生改变。同时,迭代次数 n 的值设为 1。

Step4:由新获得的δ_{sh}更新式 3-35 的暂态约束条件。再通过解式 3-30~式 3-35 描述的 TSOPF 模型获得新的系统运行点IPⁿ。

Step5:利用 OMIB 对新的系统运行点IPⁿ进行稳定性分析

(1)若 IPⁿ 稳定,则计算系统的稳定裕量 η_{stn} ,并令 $\delta_{stn}^{t_0} = \delta_{sh}$ 得到($\delta_{stn}^{t_0}, \eta_{stn}$)。

- (a) 若稳定裕量 η_{stn} 满足 $\eta_{stn} < 0.1$ 则跳转 Step8。
- (b) 若为首次迭代(n=1)则λ = 0.5λ 跳转 Step3
- (c) 若为更高次数迭代(n>1)
 将(δ^{to}_{stn}, η_{stn}) 的值赋给 (δ^{to}_n, η_n) 跳转 Step6
- (2) 若IPⁿ 不稳定,则计算系统的不稳定裕量计算 η_{un} , 令 $\delta_{un}^{t_0} = \delta_{sh}$ 得到($\delta_{un}^{t_0}, \eta_{un}$),并

将($\delta_{un}^{t_0}$, η_{un})的值赋给 ($\delta_{n}^{t_0}$, η_{n}) 跳转 Step6

Step6:(1)若(δ^{to}_{UT}, η_U)和(δ^{to}_n, η_n) 对应相同的不稳定(稳定)模式,则通过灵敏度计算公式计算出 新的δ_{sh}值跳转 Step7。

(2)若对应不同不稳定(稳定)模式, 令 λ = 0.05, 将($\delta_n^{t_0}$, η_n)赋值给($\delta_{UT}^{t_0}$, η_U), 跳转 Step3。 Step7:若满足 Step5 中的不稳定条件,则将($\delta_n^{t_0}$, η_n)赋值给($\delta_{UT}^{t_0}$, η_U) n = n + 1, 跳转 Step4 Step8: 结束。

注意到递减百分比 λ 的取值必须准确保证获得的系统运行点在 Step5 中不稳定或者又很小的稳定裕量。因此在 Step3 中, 先取 $\lambda = 0.1$ 。但若对应的系统运行点对应的稳定状态过于稳定,则 $\lambda = 0.5\lambda$ 再回到 Step3。

最后我们要注意到,满足收敛条件的需要进行的收敛次数基于不稳定(稳定)裕量关于 OMIB 模型初始功角偏差δ^{to}_{IIT}的近似线性程度,近似线性程度越高,需要迭代的次数越少。

3.3.2 暂态稳定控制算法流程框图表示





3.4 本章小结

本章从 3 个主要方面介绍了基于单机无穷大等效方法(SIME)的考虑暂态稳定约束的最 优潮流问题模型。首先从方法背景、SIME 基础、OMIB 模型基础等方面对单机无穷大方法 进行了分析。然后介绍了基于 SIME 的 TSOPF 问题模型,主要从 SIME 方法的使用、灵敏 度分析等方面描述了模型。最后介绍了暂态稳定控制算法的算法流程,并用框图表示了整个 算法流程。



第四章 考虑暂态稳定约束的最优潮流研究算例分析

上一章中我们对基于单机无穷大等效方法(SIME)的考虑暂态稳定约束的最优潮流问题 模型做了详细的描述。在本章中我们将采用 IEEE3 机 9 节点等经典测试系统对上一章中的 暂态稳定控制方法进行验证。

4.1 算例分析环境

4.1.1 最优潮流计算工具

在算例分析过程中,我们选用基于 Matlab 语言开发的 MATPOWER 工具包计算基于单 机无穷大等效方法(SIME)的考虑暂态稳定约束的最优潮流问题方法的最优潮流部分。

4.1.1.1 MATPOWER 工具包背景

电力系统潮流计算是电力系统计算分析的最基本计算之一,通过求取在给定运行方式下 电网各节点电压幅值和相角、系统中电流和功率分布。因为可以通过潮流计算结果来确定各 点电压是否满足要求、各元件是否过负荷、功率分布和功率损耗是否合理等情况,因此受到 电力系统运行部门、高校等科研机构的高度重视。最早是由人工进行潮流计算,后来随着计 算机技术的飞跃发展和计算机的广发使用。利用计算机语言编程获得的潮流仿真计算软件是 目前潮流计算的主要工具和方法,国内广泛使用的潮流计算软件有:中国电力科学研究院的 PASAP 软件,美国 Bonneville 电力局的 BPA 软件、美国 PTI 公司的 PSS /E 软件、美国电力 科学研究院的 ETVISR 软件等。这些软件大多功能强大并且成功应用于电力系统的实际仿真 计算,但这些商业潮流计算软件的价格普遍昂贵,对于研究人员和教育从业者来说,寻求免 费的可用潮流计算软件成为比较重要的选择。由美国康奈尔大学电力系统工程研究中心应用 MATLAB 语言开发的电力系统潮流仿真计算免费软件 MATPOWER 得到了广泛的使用。^[52]

4.1.1.2 MATPOWER 工具包在算例分析最优潮流计算中的使用

MATPOWER 的最早版本中的 OPF 解法是基于包含在 MATLAB 早期版本最优化工具箱中的 constr函数,它成功的使用了一种二次规划技术,对海森矩阵采用了拟牛顿逼近法。第二种方法基于线性规划。它可以使用最优化工具箱中的 LP(线性规划)解法或者其他可以获得的 MATLAB LP 解法。MATPOWER3.0 版则提供一种通用的 OPF 模型,允许一般的线性约束加入到最优化变量中,但是要求能够获得 MATLAB 最优化工具箱 2.0 或以上版本中的fmincom.m 文件,或者最优化 MINOPF 包中的基于 MINOS 的 MEX 文件。在最新的MATPOWER 4.1 版本中,最优潮流部分还可以采用自带的内点算法 mip_solver 解决。

因为 MATPOWER 默认的约束条件并不包含暂态约束条件,因此在利用 MATPOWER 工具包解决 TSOPF 问题中的最优潮流部分时,必须对 MATPOWER 源程序做出相应修改,因为 MATPOWER 的源程序都是完全开源的,因此源程序的修改并不复杂。对 MATPOWER 源程序的修改主要集中在 opf.m、opf_setup.m、opf_consfcn.m、opf_hessfcn.m、mips_solver.m 等 m 文件的修改。

4.1.2 时域仿真软件

在暂态稳定控制算法流程中,每一次迭代过程中的最优潮流部分计算完成后得到系统运行点后需要利用时域仿真软件对预设故障下的多机系统进行时域仿真分析。完成时域仿真分析后,再用单机无穷大母线模型(OMIB)计算出相应的不稳定(稳定)裕量和初始时刻等效模型功角偏差等并分析多机系统的稳定性。我们用 PSS/E 软件(University 32 版本)完成时域仿真



部分的计算。

4.1.2.1 PSS/E 软件背景

PSS/E(Power System Simulator for Engineering) 是由美国电力技术公司(Power Technologies Inc.-PTI)于上世纪70年代开发和推向市场。推向市场后,经过不断的修改和完善,PSS/E成为较为成熟的电力系统仿真软件。PSS/E可以进行潮流计算、网络等值和动态仿真、事故分析等,其中潮流计算为PSS/E核心。PSS/E可以进行潮流计算、网络等值和动力者仿真、事故分析等,其中潮流计算为PSS/E核心。PSS/E采用高效建模技术。PSS/E30版本拥有最大规模为5万条母线、10万条线路、10万个负荷以及12000台发电机的电力网络处理能力。对于PSS/E的潮流计算,相应的潮流数据输入文件为*.raw。而对于动态仿真计算和故障分析的任务,除了需要潮流计算的结果外,还需要相应的动态数据输入文件*.dyr。

4.1.2.2 PSS/E 软件的在时域仿真部分的使用

PSS?E University 32 - C:\Users\zhouyun\	Deskto	p\IEEE9zyn	new_ip4.raw - [Net	work data]		Robert Woman	A REAL PROPERTY.				_			- 0 - ×	-
野Eile Edit ⊻iew Diagram Power Flow	Fault	OPF Tran	ns <u>A</u> ccess Dynam	ics Disturb	ance <u>S</u> ubsystem	Misc I/O Contro	I <u>⊺</u> ools <u>W</u> indow	Help						_ 8	×
다 🗃 🖬 👗 🖻 🛍 🗙 🗠 🔯	3 🔊 .	<u>u</u> ?	N 🕼 +90 -90	i # 1	- •	→	國際校立工	. 🖽 1	h- A Tite	Lgad Files 🗵	×				
100% 👻 🗨 🗨 🔍 🔍	🔛 D	9 °8, E	专口 🗉 🔒		• 🕫 🖪 🖪		🕸 🐜 🔛 🕅	= 25	LF B DATE DF B	ISCE TECH RELE	me 📔 🖬	& 8			
#FFFFF56888*1	1	r 🕫 🖽	1 < > 2	5z * 🕨	1 ist se 🖶 🖶		🖾 🕼 🕼	87 T	i i i i i i	M 66 70 h	: I 🕫 🕫	i 🗊 🚿 📘			
/) 0 0 ロク	<u>동</u> 동	<u>i ke ke</u> k	ine als 60 ja	- and -a <u>&</u> Tq	2. 34 17 17 -	* 24 引 24 12	🗠 🖼 😘 🔮 🦸	ogy 📈	1 🛃 🗸 🚦	<mark>67 6</mark> 7 %.	e @	s 🖻 🖷	5 7 V e	i 🔊 🛛 18 18	1¢
生 +- 回 回 P1 P2 P3 P4 P5 P6	7,7	· *, 10 ?	1 12 13 14 1	1. 1. 1	8 29 20 21 22	23 24 25 26 27	2. 2. 3.								
+B +B +B															
		Bus	Bus	Base kV	Area Number/Name	Zone	Owner Number/Name	Code	Voltage (pu)	Angle (deg)	G-Neg	B-Neg	G-Zero	B-Zero	
Machine	1-	1	BUS_1_	16.5	1	1	1	3	0.9503	0.00					
Load	1-	2	BUS_2_	18.0	2	1	1	2	1.0500	-0.96					
Switched Shunt		3	BUS_3_	13.8	3	1	1	2	1.0500	-0.88					
Branch Branch	1-	4	BUS_4_	230.0	1	1	1	1	0.9673	-4.43					
Uteacer Useacer Useacer Useacer Useacer		5	BUS_5_	230.0	1	1	1	1	0.9612	-8.39					
- 3 Winding		6	BUS_6_	230.0	3	1	1	1	0.9774	-7.27					
2-Term DC	1-	7	BUS_7_	230.0	2	1	1	1	1.0347	-4.34					
VSC DC	1-	8	BUS_8_	230.0	2	1	1	1	1.0254	-6.31					
Area		9	BUS_9_	230.0	3	1	1	1	1.0419	-3.73					
Owner Zone	*														
Network DPF Dyna Models Plot Data	M	< F F F (Bus / Plant / Mad	nine à Load	λ Fixed Shunt λ S	witched Shunt h Bra	anch à Breaker à 2	Winding	3 Winding) Impedance	table ∖ FA	CTS) 2-Term	DC) VSC DC	λ N-Term DC λ	Area
Select an object on which to get Help			Solution not	attempted								Bi	nd items Ne	ext bus - 1	

图 4-1 PSS/E	主窗口
-------------	-----

	Bus Number	Bus Name	Base kV	Area Number/Name	Zone Number/Name	Owner Number/Name	Code	Voltage (pu)	Angle (deg)	G-Neg Load (pu)	B-Neg Load (pu)	G-Zero Load (pu)	B-Zero Load (pu)
	1	BUS_1_	16.5	1	1	1	3	0.9503	0.00				
	2	BUS_2_	18.0	2	1	1	2	1.0500	-0.96				
	3	BUS_3_	13.8	3	1	1	2	1.0500	-0.88				
	4	BUS_4_	230.0	1	1	1	1	0.9673	-4.43				
	5	BUS_5_	230.0	1	1	1	1	0.9612	-8.39				
	6	BUS_6_	230.0	3	1	1	1	0.9774	-7.27				
	7	BUS_7_	230.0	2	1	1	1	1.0347	-4.34				
	8	BUS_8_	230.0	2	1	1	1	1.0254	-6.31				
	9	BUS_9_	230.0	3	1	1	1	1.0419	-3.73				
*													

图 4-2 PSS/E 潮流输入窗口

对预设故障的多机系统的时域仿真过程中,我们先从最优潮流的计算结果中得到系统的初始运行点。在 PSS/E 潮流输入窗口输入相应的初始运行点的值。





图 4-3 PSS/E 动态条件输入窗口

多机系统的时域仿真中,发电机组的动态条件是必不可少的,我们选择发电机组经典 模型作为发电机组的动态条件。

Event Study Proper	ties	×
Parameters		
Study Name:	EventStudy1	
The settings below	are only used if the Study is i	run as a Dynamics Event Study
Channel Filename:	C:\Users\zhouyun\Desktop	o\ip4 4525out
	Run to (seconds)	6
	Integration step (seconds)	0.001
	Tolerance (p.u.)	0.0001
	Iteration limit (steps)	25
	Print interval (steps)	100
	Write interval (steps)	1
	Plot interval (steps)	0
		确定 取消

图 4-4 PSS/E 仿真参数输入窗口

在 PSS/E 仿真参数输入窗口对时域仿真的基本参数如仿真时长,仿真步长等参数进行 设置后可以开始时域仿真的过程。





图 4-5 PSS/E 仿真结果曲线输出窗口

在 PSS/E 的仿真结果曲线输出窗口,通过不同的设置,可以对时域仿真的结果用曲线进行描述。

4.1.3 算例分析流程

在 TSOPF 问题的算例中,我们先选择经典的测试系统,然后设计相应的预设故障。按照暂态稳定控制的流程,首先利用 MATPOWER 工具包计算系统常规最优潮流运行点。然后利用 PSS/E 软件对系统在预设故障下进行时域仿真。按照迭代计算流程考虑暂态约束问题时采用修改后的 MATPOWER 工具包解决,时域仿真问题用 PSS/E 软件解决。

4.1.4 经典测试系统



图 4-6 IEEE3 机 9 节点测试系统图





图 4-7 IEEE3 机 9 节点测试系统参数图

IEEE3 机 9 节点系统是一个经典的测试系统,具体的系统参数可以参照参考文献[53]中 所述。

4.2 IEEE3 机 9 节点测试系统算例 1

4.2.1 算例说明

算例 1 采用 IEEE3 机 9 节点测试系统, 故障设置为 0s 母线 7 发生三相接地故障, 400ms 时刻通过切除线路 7-5 消除故障。经过分析, 若以常规 OPF 计算得出的结果为系统初始运行点,则在预设故障下系统暂态不稳定。通过暂态稳定控制算法, 在故障切除时间不变的情况下考虑暂态约束条件, 通过迭代计算了流程就是那对系统初始运行点进行调整, 保证系统在预设故障情况下是暂态稳定的。注意到时域仿真参数如下: 仿真时长 6s, 仿真步长 0.001s, 仿真时采用惯量参考系。当系统的稳定裕量满足0 < η_{st} < 0.1时, 则认为系统极限暂态稳定 退出迭代循环。

4.2.2 算例计算过程



考虑暂态稳定约束最优潮流研究



图 4-8 常规 OPF 系统运行点时域仿真δ-t图

图 4-8 为 IEEE3 机 9 节点系统在以常规 OPF 结果为系统初始运行点时在系统预设故障 下发电机功角-时间曲线。根据临界机排序方法和间隔准则,发电机 2 和 3 组成了临界机群, 发电机 1 组成了非临界机群。迭代计算步骤如下。

4.2.2.1 IP⁰

~

38 - VOLT

9 [BUS_9_

因为初始情况无需考虑暂态约束条件,即常规的 OPF 问题。计算出的系统初始条件如下:



图 4-9 IP⁰时域仿真结果节点电压-时间曲线

230.00] : ip0





图 4-10 IP⁰ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

图 4-8、图 4-9 和图 4-10 分别为IP⁰时域仿真结果发电机功角-时间曲线、节点电压-时间 曲线图、OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线。在IP⁰初始运行点条件下,系统暂态不稳定, 不稳定裕量η_u、OMIB 等效模型初始功角偏差δ^t⁰如下及下次迭代 OMIB 等效模型期望功角 偏差δ_{sh}计算如下:

表 4-2 IP [®] 系统暂态稳定分析结果

	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$
IP ⁰	-0.01794	0.1242	0.1118

4.2.2.2 IP¹

由初始情况 IP⁰ 得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.1118,通过修改的 MATPOWER 工具包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:



表 4-3 IP¹系统初始条件

图 4-11 IP¹时域仿真结果发电机功角-时间曲线



考虑暂态稳定约束最优潮流研究



图 4-12 IP¹时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-13 IP1 OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

在IP¹初始运行点条件下,系统暂态不稳定,不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角 偏差δ^to如下。并通过灵敏度计算获得下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差δ_{sh}计算如下:

表 4-4	IP ¹ 系统暂态稳定分析结果	

	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$
IP ¹	-0.007350	0.1118	0.1032

4.2.2.3 IP²

由IP¹得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.1032,通过修改的 MATPOWER 工具 包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:

	表 4-5 IP"系统初始条件							
	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)	
IP ²	110.55	10.63	110.14	7.38	97.47	-10.56	1132.54	





图 4-14 IP²时域仿真结果发电机功角-时间曲线



图 4-15 IP²时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-16 IP² OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

在IP²初始运行点条件下,系统暂态不稳定,不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角



偏差δ^to如下。并通过灵敏度计算获得下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差δ_{sb}计算如下:

表 4-6 IP ⁴ 系统暂态稳定分析结果						
	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$			
IP ²	-0.002948	0.1032	0.09751			

4.2.2.4 IP³

由IP²得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.09751,通过修改的 MATPOWER 工具 包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:



图 4-18 IP³时域仿真结果节点电压-时间曲线







图 4-20 IP² 和IP³ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线(b)

图 4-19 是IP³ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线。观察图 4-20 中IP² 和IP³ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线。3 机 9 节点系统在IP³初始运行点条件下和在IP²初始运行点条件下失稳模式不同,灵敏度计算公式不适用,因此按 $\delta_{sh} = 0.95\delta^{t_0}$ 获得下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} 。不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角偏差 δ^{t_0} 和 δ_{sh} 的值计算如下:

表 4-8 IP³系统暂态稳定分析结果

	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$
IP ³	-0.002199	0.09751	0.09263

 $4.2.2.5 \ IP^4$

由IP³得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.09263,通过修改的 MATPOWER 工具 包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:

_	表 4-9 IP ⁴ 系统初始条件						
	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)
IP ⁴	112.31	5.64	109.04	9.51	96.82	-6.59	1132.93





图 4-21 IP⁴时域仿真结果发电机功角-时间曲线



图 4-22 IP⁴时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-23 IP⁴ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

从图 4-21~图 4-23 可以看出 IEEE3 机 9 节点系统在预设故障条件下暂态稳定,稳定裕



量η_{st}、OMIB等效模型初始功角偏差δ^to计算如下。

表 4-10 IP⁴系统暂态稳定分析结果

	$\eta_{st}(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$
IP^4	0.06838	0.09263

因为η_{st} < 0.1,迭代计算结束,IP⁴对应的初始运行点即为 IEEE3 机 9 节点系统在预设 故障情况下的极限暂态稳定点。

4.2.3.1 算例过程总结

表 4-11 算例迭代过程系统发电机出力及燃料费用和汇总表

	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)
IP ⁰	105.94	17.30	113.04	4.77	99.24	-15.56	1132.18
IP^1	109.12	14.94	111.04	5.57	98.00	-13.89	1132.32
IP ²	110.55	10.63	110.14	7.38	97.47	-10.56	1132.54
IP ³	111.51	7.94	109.54	8.52	97.11	-8.44	1132.74
IP ⁴	112.31	5.64	109.04	9.51	96.82	-6.59	1132.93
		- Andre Ares York, Alley S.		المراجعة والمراجعة المراجعة ا			

表 4-12 算例迭代过程稳定裕量、等效模型初始和期望功角偏差汇总表

	$\eta(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	δ_{sh} 的获得	$\delta_{sh}(rad)$	Cost(\$/hr)
IP ⁰	-0.01794	0.1242	$0.9*\delta^{t_0}$	0.1118	1132.18
IP^1	-0.007350	0.1118	灵敏度	0.1032	1132.32
			计算		
IP ²	-0.002948	0.1032	灵敏度	0.09751	1132.54
			计算		
IP ³	-0.002199	0.09751	$0.95^*\delta^{t_0}$	0.09263	1132.74
IP^4	0.06838	0.09263	结束选	步代循环	1132.93

表 4-11 和表 4-12 汇总了暂态稳定控制算法流程中每次迭代计算的发电机出力情况、系 统发电机组费用和、稳定裕量和相应的等效模型初始和期望功角偏值。从汇总表格看出,随 着迭代次数的增加,OMIB 等效模型期望功角偏差δ_{sh}越来越小,这意味着 TSOPF 问题中的 暂态约束条件越来越强。同时系统的不稳定裕量随着迭代次数的增加越来越小,最终变为正 值,系统在预设故障情况下由暂态失稳变得暂态稳定。但需要注意的是随着暂态稳定性的改 善,TSOPF 问题的目标函数即系统发电机组燃料费用之和也在增加的。

4.2.3.2 系统极限暂态稳定运行点的证明

上一节中,通过暂态稳定控制算法流程我们得到了在预设故障下 IEEE3 机 9 节点系统的一个暂态稳定的初始运行点。为了验证得到的暂态稳定运行点是极限稳定运行点,我们将故障切除时间由预设的 400ms 增长为 405ms,用获得的暂态稳定的初始运行点对系统进行时域仿真,再用 OMIB 等效模型分析其稳定性。

^{4.2.3} 算例结果分析







图 4-25 IP⁴ t_{cl} = 405ms时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-26 IP⁴ t_{cl} = 405ms OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线 从图 4-24~图 4-26,可以看出 IEEE3 机 9 节点原预设故障情况下暂态稳定初始运行点IP⁴



的情况下,若将故障的切除时间由 400ms 增长为 405ms 则系统重新变得暂态不稳定。所以可以证明在原预设故障和故障切除时间情况下, IP⁴的系统初始运行点不仅是系统暂态稳定运行点而且是系统极限暂态稳定约束点。

4.3 IEEE3 机 9 节点测试系统算例 2

4.3.1 算例说明

算例 2 采用 IEEE3 机 9 节点测试系统,故障设置为 0s 母线 7 发生三相接地故障,450ms 时刻通过切除线路 7-5 消除故障。时域仿真参数如下: 仿真时长 6s,仿真步长 0.001s,仿真 时采用惯量参考系。当系统的稳定裕量满足0 < η_{st} < 0.1时,则认为系统极限暂态稳定退出 迭代循环。





图 4-27 常规 OPF 系统运行点时域仿真δ – t图

图 4-27 为 IEEE3 机 9 节点系统在以常规 OPF 结果为系统初始运行点时在系统预设故障 下发电机功角-时间曲线。根据临界机排序方法和间隔准则,发电机 2 和 3 组成了临界机群, 发电机 1 组成了非临界机群。迭代计算步骤如下。

4.3.2.1 IP⁰

因为初始情况无需考虑暂态约束条件,即常规的 OPF 问题。计算出的系统初始条件如下:

表 4-13 IP⁰系统初始条件

	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)
IP ⁰	105.94	17.30	113.04	4.77	99.24	-15.56	1132.18
	由 PSS/E 转	次件对系统在到	顶设故障下的	的时域仿真,	再利用 OMI	B 模型对时域	访真结果进

行分析。



考虑暂态稳定约束最优潮流研究





图 4-29 IP⁰ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

图 4-27、图 4-28 和图 4-29 分别为IP⁰时域仿真结果发电机功角-时间曲线、节点电压-时间曲线图、OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线。在IP⁰初始运行点条件下,系统暂态不稳定,不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角偏差 δ^{t_0} 如下及下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} 计算如下:

	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$
IP ⁰	-0.06414	0.1242	0.1118

 $4.3.2.2 \text{ IP}^1$

由初始情况IP⁰得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.1118,通过修改的 MATPOWER 工具包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:

	衣 4-15 IP - 系统初始兼件						
	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)
IP1	109.12	14.94	111.04	5.57	98.00	-13.89	1132.32

表 4-15 IP¹系统初始条件





图 4-30 IP¹时域仿真结果发电机功角-时间曲线



图 4-31 IP¹时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-32 IP¹ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

在IP¹初始运行点条件下,系统暂态不稳定,不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角



偏差δ^to如下。并通过灵敏度计算获得下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差δ_{sb}计算如下:

表 4-16 IP ¹ 系统暂态稳定分析结果							
$\eta_u(pu-rad) \qquad \qquad \delta^{t_0}(rad) \qquad \qquad \delta_{sh}(rad)$							
IP ¹	-0.05318	0.1118	0.05167				

4.3.2.3 IP²

由IP¹得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差δ_{sh}=0.5167,通过修改的 MATPOWER 工具 包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:



图 4-34 IP²时域仿真结果节点电压-时间曲线





图 4-35 IP² OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

在IP²初始运行点条件下,系统暂态不稳定,不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角 偏差 δ^{t_0} 如下。并通过灵敏度计算获得下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} 计算如下:

表 4-18 IP²系统暂态稳定分析结果

	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$
IP ²	-0.01360	0.05167	0.03101

$4.3.2.4 \ IP^3$

由IP²得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.03101,通过修改的 MATPOWER 工具 包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:



表 4-19 IP³系统初始条件

图 4-36 IP³时域仿真结果发电机功角-时间曲线



考虑暂态稳定约束最优潮流研究



图 4-37 IP³时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-38 IP³ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线(a)

在IP³初始运行点条件下,系统暂态不稳定,不稳定裕量 η_u 、OMIB 等效模型初始功角 偏差δ^to如下。并通过灵敏度计算获得下次迭代 OMIB 等效模型期望功角偏差δ_{sh}计算如下: 表 4-20 IP³ 系统 新太 稳 完 分 析 结 里

	衣 4-20 IF 示匀	自心闷足力机治术	
	$\eta_u(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	$\delta_{sh}(rad)$
IP ³	-0.004673	0.03101	0.02020

4.3.2.5 IP⁴

由IP³得到的 OMIB 等效模型期望功角偏差 δ_{sh} =0.02020,通过修改的 MATPOWER 工具 包进行最优潮流计算得到系统运行点如下:

	表 4-21 IP*系统初始条件							
	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)	
IP ⁴	123.18	-23.24	102.68	28.75	92.97	16.82	1138.36	





图 4-39 IP⁴时域仿真结果发电机功角-时间曲线



图 4-40 IP⁴时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-41 IP⁴ OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

从图 4-39~图 4-41 可以看出 IEEE3 机 9 节点系统在预设故障条件下暂态稳定,稳定裕



量η_{st}、OMIB等效模型初始功角偏差δ^to计算如下。

表 4-22 IP	4系统暂态稳	定分析结果
-----------	--------	-------

	$\eta_{st}(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$
IP ⁴	0.02817	0.02020

因为η_{st} < 0.1,迭代计算结束,IP⁴对应的初始运行点即为 IEEE3 机 9 节点系统在预设 故障情况下的极限暂态稳定点。

4.3.3 算例结果分析

4.3.3.1 算例过程总结

表 4-23 算例迭代过程系统发电机出力及燃料费用和汇总表

	$P_{g1}(MW)$	$Q_{g1}(MVar)$	$P_{g2}(MW)$	$Q_{g2}(MVar)$	$P_{g3}(MW)$	$Q_{g3}(MVar)$	Cost(\$/hr)
IP ⁰	105.94	17.30	113.04	4.77	99.24	-15.56	1132.18
IP^1	109.12	14.94	111.04	5.57	98.00	-13.89	1132.32
IP ²	118.71	-11.98	105.20	19.52	94.53	7.62	1135.47
IP ³	121.43	-20.21	103.69	26.24	93.60	14.19	1137.30
IP ⁴	123.18	-23.24	102.68	28.75	92.97	16.82	1138.36

表 4-24 算例迭代过程稳定裕量、等效模型初始和期望功角偏差汇总表

	$\eta(pu-rad)$	$\delta^{t_0}(rad)$	δ_{sh} 的获得	$\delta_{sh}(rad)$	Cost(\$/hr)
IP ⁰	-0.06414	0.1242	$0.9*\delta^{t_0}$	0.1118	1132.18
IP ¹	-0.05318	0.1118	灵敏度	0.05167	1132.32
			计算		
IP ²	-0.01360	0.05167	灵敏度	0.03101	1135.47
			计算		
IP ³	-0.004673	0.03101	灵敏度	0.02020	1137.30
			计算		
IP^4	0.02817	0.02020	结束边	5代循环	1138.36

表 4-23 和表 4-24 汇总了暂态稳定控制算法流程中每次迭代计算的发电机出力情况、系统发电机组费用和、稳定裕量和相应的等效模型初始和期望功角偏值。和算例 1 相比,算例 2 最后的暂态稳定运行点对应的暂态约束条件比算例 1 的暂态约束条件更加苛刻,系统的目标函数值也比算例 1 中的目标函数值大。

4.3.3.2 系统极限暂态稳定运行点的证明

上一节中,通过暂态稳定控制算法流程我们得到了在预设故障下 IEEE3 机 9 节点系统的一个暂态稳定的初始运行点。为了验证得到的暂态稳定运行点是极限稳定运行点,我们将故障切除时间由预设的 450ms 增长为 455ms,用获得的暂态稳定的初始运行点对系统进行时域仿真,再用 OMIB 等效模型分析其稳定性。







图 4-43 IP⁴ t_{cl} = 455ms时域仿真结果节点电压-时间曲线



图 4-44 IP⁴ t_{cl} = 455ms OMIB 等效模型发电机功率-功角曲线

从图 4-42~图 4-44,可以看出 IEEE3 机 9 节点原预设故障情况下暂态稳定初始运行点IP4



的情况下,若将故障的切除时间由 450ms 增长为 455ms 则系统重新变得暂态不稳定。所以可以证明在原预设故障和故障切除时间情况下, IP⁴的系统初始运行点不仅是系统暂态稳定运行点而且是系统极限暂态稳定约束点。



第五章 结论与展望

本文提出了一种多机系统暂态稳定控制的考虑暂态稳定性约束的最优潮流新方法。新方 法用一个系统初始运行点的稳态约束条件代替了其它的TSOPF模型中需要的大量的动态和 暂态约束条件。作为新方法最突出的优点,TSOPF问题的规模被降低到和传统最优潮流问题 相近的程度。问题规模的下降有利于提高系统获得系统最优解的可行性和减少了计算机编程 的复杂性,并使得考虑暂态稳定性约束的最优潮流拥有更加广泛和实际的应用。

本文绪论部分先介绍了考虑暂态稳定约束最优潮流问题的研究背景和研究意义,然后介 绍了 TSOPF 问题国内外的研究现状和本文的主要研究内容。在论文的主体部分,第二章从 最优潮流问题模型和考虑暂态约束最优潮流通用模型两个方面对 TSOPF 的一般模型做了描 述。第三章先对单机无穷大方法做了介绍,然后介绍了基于单机无穷大方法的 TSOPF 问题 模型。在第三章的最后,介绍了 TSOPF 问题的暂态稳定控制算法,并描述了暂态稳定控制 算法的流程。第四章算例分析部分,我们选择了 IEEE3 机 9 节点系统和相应的预设故障通 过暂态稳定控制算法流程对系统进行了暂态稳定控制。通过对算例结果的分析验证了 TSOPF 新方法的正确性和有效性。

TSOPF 的重要性已为人们广泛认识,但目前该领域的研究工作距离工程应用要求尚有 一定距离。近年来,现代优化理论以及计算技术的发展给 TSOPF 问题的研究带来了新的契 机。TSOPF 问题涉及到广泛的数学理论和计算方法,概括地讲 TSOPF 问题的主要研究任务 包括建模和求解两个方面内容。^[2]

建模研究中,暂态稳定性约束的数学模型是一个难点。不同的描述形式可得到复杂程度 不同的优化模型,并直接影响到后续算法的设计和求解效率。一般而言,不等式约束的处理 技术在很大程度上决定了约束优化问题算法性能的优劣。在 TSOPF 问题中,由于大量稳定 性不等式约束的引入,使其问题的规模比 OPF 问题大大增加。而暂态稳定性不等式约束处 理问题成为决定算法速度和收敛性的根本性因素。如何更好的处理不等式约束,合理设计算 法,有效地简化问题的处理是 TSOPF 问题在以后研究中要考虑的主要问题之一。

在 TSOPF 问题中考虑多个事故的影响,合理简化问题分析,也是 TSOPF 算法应该值得 关注另一个问题。如何利用动态电力系统的固有特征,合理设计算法,有效减轻考虑多种事 故情况下的计算负担,也成为 TSOPF 求解中需要着重考虑的问题。

随着电力市场化改革的不断深入,电力系统将在一个日益开放的竞争环境中运行,传统 管理体制下系统的运行方式和调度模式将发生根本改变。新的商业环境下,越来越多的工程 问题需要采用优化的方法来分析和解决,借助 TSOPF 方法解决这些新问题也将成为人们研 究的重点。



参考文献

- [1] 孙晓彦. 电力系统电压稳定约束下的最优潮流研究[D]. 天津大学 2006.
- [2] 孙元章,杨新林,王海风.考虑暂态稳定性约束的最优潮流问题[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 56-59.
- [3] 黄志光. 含暂态稳定约束的电力系统最优潮流研究[D]. 浙江大学 2010.
- [4] Carpentier J. Contribution to the economic dispatch problem[J]. Bull. Soc. France Elect, 1962, 8(2): 431-437.
- [5] Han Z X, Jiang Q Y, Cao Y J. Sequential feasible optimal power flow in power systems[J]. Science in China, Series E-Technological Science, 2009, 52(2):429-435.
- [6] Jiang Q Y, Han Z X. Solvability identification and feasibility restoring of divergent optimal power flow problems[J]. Science in China, Series E-Technological Science, 2009, 52(3): 944-954.
- [7] 郝玉国, 刘广一, 于尔铿. 一种基于 Karmarkar 内点法的最优潮流算法[J]. 中国电机工程 学报, 1996, 16(6): 409-412.
- [8] 赵晋泉,侯志俭,吴际舜.牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法[J]. 电力系统 自动化,1999,23 (23): 37-40.
- [9] 郭瑞鹏,吴浩,韩祯祥,等.在线多预想故障静态电压崩溃预防控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26 (19): 1-6.
- [10] Capitanescu F, Glavic M, Ernst D, et al. Contingency filtering techniques for preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1690-1697.
- [11] Momoh J A, Koessler R J, Bond M S, et al. Challenges to optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1):444-447.
- [12] Gan Deqiang, Thomas R J, Zimmerman R D. Stability-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 535-540.
- [13] Chen Luonan, Tada Y, Okamoto H, et al. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints[J]. IEEE Transactions Circuit & Systems (I): Fundamental Theory & Applications, 2001, 48(3): 327-339.
- [14] Sun Yuanzhang, Yang Xinlin, Wang Haifeng. Approach for optimal power flow with transient stability constraints[J]. IEEE Proceedings-Generation, Transmission & Distribution, 2004, 151(1): 8-18.
- [15] 孙景强,房大中,锤德成. 暂态稳定约束下的最优潮流[J]. 中国电机工程学报,2005,25 (12):12-17.
- [16] 夏德明,梅生伟,沈沉,等.基于暂态稳定裕度指标的最优潮流求解[J].电力系统自动化, 2006, 30 (24): 5-10.
- [17] 刘明波,阳曾. 含暂态能量裕度约束多故障最优潮流计算.中国电机工程学报[J],2007 27 (34): 12-18.
- [18] Yuan Yue, Kubokawa J, Sasaki H. A solution of optimal power flow with multi-contingency transient stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1094-1102.
- [19] 李贻凯,刘明波.多故障暂态稳定约束最优潮流的轨迹灵敏度法[J].中国电机工程学报,



2009, 29(16): 42-48.

- [20] Xia Yan, Chan K W. Dynamic constrained optimal power flow using semi-infinite programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1455-1457.
- [21] 吴荻,辛焕海,甘德强.考虑暂态稳定约束最优潮流的算例分析[J].电力系统自动化,2007, 31 (5): 1-6
- [22] Mo N, Zou Z Y, Chan K W, et al. Transient stability constrained optimal power flow using particle swarm optimization[J]. IET Proceedings-Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(3): 476-483.
- [23] Cai H R, Chung C Y, Wong K P. Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 719-728.
- [24] Scala M L, Trovato M, Antonelli C. On-line dynamic preventive control: an algorithm for transient security dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 601-610.
- [25] Chan K Y, Ling S H, Chan K W, et al. Solving multi-contingency transient stability constrained optimal power flow problems with an improved GA[J]. IEEE Proceedings-Congress on Evolutionary Computation, pp. 2901-2908, Sep. 2007.
- [26] 徐泰山,薛禹胜李碧君,等.暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J].电力系统自动化, 2009 33(22):1-4.
- [27] 倪以信,陈寿孙,张宝霖,动态电力系统的理论和分析[M].北京:清华大学出版社,2002, 188.
- [28] 韦化, 阳育德, 李啸驰. 多预想故障暂态稳定约束最优潮流[J].中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 91-96
- [29] Alejandro Pizano-Mart nez, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Daniel Ruiz-Vega. A New Practical Approach to Transient Stability-Constrained Optimal Power Flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3):1686-1696.
- [30] D. Gan, R. J. Thomas, R. D. Zimmerman. Stability-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2):535-540.
- [31] M. La Scala, M. Trovato, C. Antonelli. On-line dynamic preventive control: An algorithm for transient security dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2):601-610.
- [32] Y. Yuan, J. Kubokawa, H. Sasaki. A solution of optimal power flow with multicontingency transient stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3):1094-1102.
- [33] L. Chen, Y. Tada, H. Okamoto, R. Tanabe, A. Ono. Optimal operation solutions of power systems with transient stability constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 48(3):327-339.
- [34] Y. Xia, K. W. Chan. Dynamic constrained optimal power flow using semi-infinite programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3):1455-1457.
- [35] Y. Xia, K. W. Chan, M. Liu. Improved BFGS method for optimal power flow calculation with transient stability constraints[C]. Proc. 2005 IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, 434– 439.
- [36] X. Tong, C. Ling, L. Qi. A semi-infinite programming algorithm for solving optimal power flow with transient stability constraints[J]. J. Comput. Appl. Math, 2008, 217(2):432-447.
- [37] M. Pavella, D. Ernst, D. Ruiz-Vega. Transient Stability of Power Systems: A Unified Approach to Assessment and Control[M]. Norwell, MA: Kluwer, 2000.



- [38] R. Zárate-Miñano, T. Van Cutsem, F. Milano, A. J. Conejo. Securing transient stability using time-domain simulations within an optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):243-253.
- [39] A. Pizano-Martinez, C. R. Fuerte-Esquivel, D. Ruiz-Vega. Global transient stability-constrained optimal power flow using an OMIB reference trajectory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1):392-403.
- [40] 万黎, 袁荣湘. 最优潮流算法综述[J]. 继电器, 2005, 33(11):80-87.
- [41] 安宇, 王明. 电力系统最优潮流分析[J]. 中国电力教育, 2010, 16:254-255.
- [42] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M], 北京: 科学出版社, 2003.
- [43] 张江红, 孟宪朋, 刘怀东, 陈昊, 陈方正. 最优潮流算法综述[J]. 华北电力技术, 2010, 7:23-27.
- [44] 哀贵川, 土建全. 考虑了动态约束和稳定约束的最优潮流[J]. 电力系统及其自动化学报.2003, 15 (3): 1-5.
- [45] 赵晋泉, 侯志俭, 吴际舜. 改进最优潮流牛顿算法有效性的对策研究[J]. 中国电机工程 学报. 1999, 19 (12): 70-75.
- [46] 熊伟. 牛顿法最优潮流[C]. 全国高校电力系统及其自动化专业第11届学术年会论文集. 1995.
- [47] 张小平, 陈朝晖. 基于内点法的安全约束经济调度[J]. 电力系统自动化. 1997, 21 (G): 27-29.
- [48] 徐进东, 丁晓群, 覃振成等. 基于非线性预报校正内点法的电力系统无功优化研究[J]. 电网技术. 2005, 29(9):36-40.
- [49] 刘明波, 陈学军. 电力系统无功优化的改进内点算法[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(2): 33-36.
- [50] 史继莉, 邱晓燕. 人工智能在最优潮流中的应用综述[J]. 继电器, 2005, 33(16): 85-89.
- [51] Y Zhang, L Wehenkel, P Rousseaux, M Pavella. SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1997, 19(3):195-208.
- [52] 李红连, 张维理, 刘录东, 张 强. 潮流计算软件 MATPOWER 及其应用. 重庆电力高等 专科学校学报, 2009, 14(4):18-20.



谢辞

首先要感谢严正老师这学期在毕业设计期间的悉心指导,是老师渊博的学识给我诸多指 引和帮助,才能够最终完成整个的设计任务。严老师严谨的治学态度不仅帮助我完成了毕业 设计,也深刻影响了我的思维,让我学会用严肃认真的态度去对待今后的工作和生活。

此外,还要特别感谢徐潇源师兄在毕设的过程中的多次讨论给予了我很大的帮助.也要 感谢实验室的师兄师姐,在大大小小的问题上都不吝赐教,帮我度过了很多难关。

还要感谢所有大学期间在精神上、学习上帮助过我的同学,感谢你们和我一起努力,一 起成长,陪伴我一起度过丰富精彩的大学生活。

最后我想感谢我的父母,是他们在我的背后给了我最大的动力鞭策着我不断前进、进步, 增加了我面对各种困难时的勇气和信心。



RESEARCH OF OPTIMAL POWER FLOW WITH TRANSIENT STABILITY CONSTRAINTS

Modern power systems' operation should be reliable, secure and economical as the scale of the systems is becoming larger and larger. A conciliation between the economics and transient stability security requirements is possible by formulating the transient stability (TS) problem and the generation dispatch problem as an integrated mathematical optimization problem, which is referred to as Transient Stability constrained Optimal Power Flow (TSOPF).

Two main steps should be taken into consideration to meet the approach. First, to ensure that the synchronous generators maintain stability in response to a specified contingency, both dynamic-state and transient stability constraints should be formulated in analytical expressions of the transient stability problem. Second, these constraints are included in discretized form into the OPF formulation, and an optimal generation dispatch is determined by solving the optimization problem by conventional programming methods. After solve the TSOPF described before, an optimal equilibrium point is computed that is transiently stable.

To solve the transient stability problems, the conventional, world-wide accepted approach relies on time-domain numerical integration. The main advantage of this approach is the ability to handle any power system modeling and to provide detailed time-domain descriptions of the physical phenomena. The main drawback is the lack of sensitivity and control information. Despite the performance of computer develops rapidly in recent years, time-domain methods remain computationally demanding.

In order to avoid the above weaknesses, Lyapunov-like direct methods started being developed in the early 1960s. Another type of direct method, based on the equal-area criterion, was proposed around the1980s. The Single Machine Equivalent (SIME) relies on time-domain simulations with early termination and calculation of stability limits dictated by the equal-area criterion is also a hybrid time-domain-direct method.

More specifically, SIME replaces a multi-machine power system by a one-machine infinite bus system, and assesses transient stability by: (i) running a time-domain simulation of the multi-machine system for a short integration period dictated by the well-known equal-area criterion; (ii) computing via this criterion the corresponding stability margin; (iii) appraising the stability limit (critical clearing time or power limit) by extrapolating successive stability margins. The direct outcomes of this approach are: a substantial gain in computing time over time-domain methods on the one hand and assessment of margins and identification of the system critical machines on the other hand. In turn, these latter pieces of information open a whole range of applications to analysis, sensitivity analysis and means of control.

After transformation of the rotor angle trajectories of a multi-machine system to the angle space of a single rotor angle trajectory of a one machine infinite bus (OMIB) equivalent whose stability properties, inferred from the equal area criterion (EAC), define the transient stability properties of the multi-machine system, the transient stability of the multi-machine system can be



controlled by constraining the OMIB's rotor angle maximum excursion to a value that ensures system transient stability.

This constraint is naturally derived from SIME and is formulated as an initial value problem in terms of the variables that characterize the initial steady-state operating point of the multi-machine power system. Consequently, the number of dynamic and transient stability constraints to be considered in the TSOPF formulation is reduced to a single, time independent, stability constraint, such that the dimension of the resulting optimization problem is reduced to a size very similar to the one of a conventional OPF model.

The stability constraint proposed in this paper allows us to obtain and incorporate its Jacobian and Hessian matrices into the conventional OPF problem seamlessly, overcoming the difficulties of the constraint transcription technique associated with the transient constraint derivation and the computational burden required to calculate its gradient terms.

The new approach to global TSOPF for controlling first and multi-swing in stabilities proposed in this paper overcomes the main drawbacks of this kind of method, by reducing the size of the optimization problem to one very similar to that of a conventional OPF, and by solving the problem of deriving and including the stability constraints in the OPF, improving, in this way, the practical application of global TSOPF techniques.

In the new global TSOPF techniques, we use MATPOWER-a power system toolbox based on Matlab to solve OPF problems. In the early phase of accomplishment of optimal power, we choose MATPOWER version 3.1 to solve OPF problems. But after essential modification to MTPOWER 3.1, we cannot get a global optimal solution of the power system but a local optimal solution instead. So we try a higher version of MATPOWER to get the global optimal solution of the power system. So we modify some m files such as opf.m, opf_setup.m, opf_consfcn.m, opf_hessfcn.m, mips_solver.m in MATPOWER 4.1 and use the embedded OPF algorithm to get the global optimal solution of the power system. After use a higher version of MATPOWER, we successfully get the global optimal solution of OPF models considered transient constrains which are formulated by constraining the OMIB's rotor angle maximum excursion to a value that ensures system transient stability.

In TSOPF, we choose some open-source toolbox like power system analysis toolbox (PSAT) and power system toolbox (PST) to do time-domain simulation. But neither the time-domain simulation results get from power system analysis toolbox or power system toolbox meets the demand in the proposed method. In order to ensure the accuracy of time-domain simulation results, we choose power system commercial calculation software PSS/E(Education Version) to do time-domain simulation. Because of the use of PSS/E, the problem we meet before in time-domain simulation of transient stability constrained optimal power flow is solved. As the time domain simulation results we gain from PSS/E is accurate and effective, we can use the results to do further one machine infinite bus equipment to analysis the transient stability of the considered power system.

In order to illustrate numerically the prowess of the approach proposed in this paper to control transient stability, the IEEE three-machine nine-bus test system is considered in the numerical examples. The classical generator model is considered in all cases. We consider two different definite fault cases in IEEE three-machine nine-bus test system to illustrate the proposed transient stability control method. Firstly, a single contingency scenario is defined by a solid three-phase fault to ground at bus 7 applied at t=0, which is cleared by tripping line 7-5 at



 $t_{cl} = 400$ ms. For this contingency and initial operation point calculated by conventional optimal power flow method, SIME simulation determines a first-swing unstable OMIB equivalent, with critical generators at nodes 2 and 3, and a noncritical generator at node 1.After 4 times iteration, we get a power system operation point which is transient stable while the system undergoes the default fault. As illustrated later, this operation point is a limit transient stable operation point. Secondly, a single contingency scenario is defined by a solid three-phase fault to ground at bus 7 applied at t=0, which is cleared by tripping line 7-5 at $t_{cl} = 450$ ms. For this contingency and initial operation point, SIME simulation determines a first-swing unstable OMIB equivalent, with critical generators at nodes 2 and 3, and a noncritical generator at node 1.After 4 times iteration, we get a power system operation point which is transient stable while the system undergoes the default fault. As illustrated later, this operation generator at node 1.After 4 times iteration, we get a power system operation point which is transient stable operation point. Lastly, the results obtained by the new proposed approach in the paper showed that the new TSOPF transient stability control method is valid and effective.

The importance of TSOPF has a broad understanding for people, but the research in the field of engineering application needs more work and have a long way to go. In recent years, progress in modern optimization theory and development of the calculation technology brings new opportunities to TSOPF research. With the deepening reform of the electricity market, electric power system will be more open and operate in a more competitive environment. In new business environment, more and more engineering problems need to be analyzed and solved by the optimization method. These new problems with TSOPF methods also become the focus of research.