

华北电力大学

学术硕士学位论文

考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号建模方法研究与应用

Research and Application of Small Signal Modeling
Method for AC/DC Hybrid System Considering
Voltage Variation

李至峪

2021 年 06 月

国内图书分类号: TM712
国际图书分类号: 621.3

学校代码: 10079
密级: 公开

学术硕士学位论文

考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号建模方法研究与应用

硕士研究生: 李至峪

导师: 刘崇茹教授

申请学位: 工学硕士

学科: 电气工程

专业: 电气工程

所在学院: 电气与电子工程学院

答辩日期: 2021 年 06 月

授予学位单位: 华北电力大学

Classified Index: TM712
U.D.C: 621.3

Dissertation for the Academic Master's Degree

**Research and Application of Small Signal Modeling
Method for AC/DC Hybrid System Considering
Voltage Variation**

Candidate:	Li Zhiyu
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Subject:	Electrical Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	June, 2021
Degree-Confering-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

近年来,基于电网换相换流器的高压直流输电技术(LCC-HVDC)在我国快速发展,成为解决远距离、大容量输电的有效手段,这也对交直流混合系统的稳定运行提出了更高的要求。目前大部分研究对含LCC-HVDC的交直流混合系统进行小信号稳定性分析时都是着重研究直流控制系统对稳定性的影响,将发电机等效为电压源,分析结果无法完整揭示交直流混合系统稳定机理,并且研究过程中使用的小信号模型精度有待提高。为实现对交直流混合系统准确的小信号稳定分析,提高系统稳定性,本文提出了一种考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号建模方法并进行了应用。

本文首先研究了交直流混合系统小信号建模方法,运用模块化建模思想将交直流混合系统分为交流和直流两个子系统分块建模,并选用节点注入功率分量与电压的幅值相角作为交直流系统的连接变量,简化了建模过程,增强了模型的通用性。

然后,考虑遭受小干扰后换流母线电压的动态过程对小信号模型的影响,在模型中引入了新的状态方程,并修正了逆变侧换流器内部的角度关系与关断角表达式,提出了考虑电压动态过程的小信号模型。通过PSCAD电磁暂态仿真对模型进行了验证,并与传统小信号模型作对比,结果表明本文建立的考虑电压动态过程的小信号模型精度高,使用该模型进行小信号稳定性分析时得到的结果更准确。

最后,使用本文建立的考虑电压动态过程的小信号模型分析了交直流混合系统的小信号稳定性,研究了参数对系统稳定性的影响。分析结果表明,由于发电机的加入,会向交直流系统中添加新的可能穿越虚轴的特征根,系统中将出现新的失稳模态。为了保证系统的稳定运行,以最小阻尼比为指标计算了控制参数稳定域,通过仿真验证了稳定域的正确性,可以为提高系统的运行稳定性提供指导。

关键词: 交直流混合系统; 小信号模型; 电压动态过程; 稳定域

Abstract

In recent years, LCC-HVDC technology has developed rapidly in China, and has become an effective means to solve long-distance and large-capacity transmission. At the same time, it also puts forward higher requirements for the stable operation of AC-DC hybrid system. Most studies on small signal stability analysis of AC/DC hybrid system with LCC-HVDC focus on the influence of DC control system on the stability, and the generator is equivalent to a voltage source, which makes the analysis result unable to fully reveal the AC/DC hybrid system stability mechanism. And the accuracy of small signal model used in studies needs to be improved. In order to accurately analyze the small signal stability of AC/DC hybrid system and improve the system stability, a small signal modeling method for AC/DC hybrid system considering the influence of voltage variation is proposed and applied in this thesis.

Firstly, the small signal modeling method for AC/DC hybrid system is studied. In this thesis, the AC/DC hybrid system is divided into AC and DC subsystems, the node injected power and the voltage amplitude and angle is chosen as the connection variable of the AC/DC system, which simplifies the modeling process and enhances the universality of the model.

Furthermore, in view of the influence of the dynamic process of the converter bus voltage on the small signal model, a small signal model considering the voltage variation is presented. A new state equation is introduced into the model, the angle relationship inside the inverted side converter station and the expression of trigger angle is corrected. The model is validated by PSCAD electromagnetic transient simulation and compared with the traditional small signal model. The results show that the small signal model considering the influence of voltage variation established by this method has high accuracy and high small interference stability analysis accuracy.

Finally, the small signal stability of AC / DC hybrid system is analyzed by using the small signal model considering voltage variation established in this thesis. The influence of parameters on the system stability is studied. The PSCAD electromagnetic transient simulation results show that due to the addition of generators, new eigenvalues that may cross the virtual axis will be added to the AC / DC system, and new instability modes will appear in the system. In order to ensure stability of the system, the stability domain of the control parameters is calculated with the minimum damping ratio as the index. The correctness of the stability domain

is verified by simulation, which can provide guidance for improving the operation stability of the system.

Keywords: AC / DC hybrid system, small signal model, voltage variation, stability domain

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及选题意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 小信号模型建模方法.....	2
1.2.2 小信号分析方法.....	3
1.2.3 小信号稳定性分析的应用.....	4
1.2.4 需要解决的问题.....	5
1.3 本文的主要工作.....	5
第 2 章 交直流混合系统小信号建模及分析方法.....	7
2.1 引言.....	7
2.2 小信号模型的建立.....	7
2.3 交流子系统小信号模型.....	8
2.3.1 同步发电机.....	8
2.3.2 励磁系统.....	9
2.3.3 交流网络.....	10
2.4 直流子系统小信号模型.....	11
2.4.1 LCC-HVDC 系统结构.....	11
2.4.2 直流线路.....	11
2.4.3 换流器.....	12
2.4.4 触发角控制器.....	14
2.4.5 锁相环.....	16
2.5 交直流混合系统小信号模型.....	16
2.6 特征值分析法.....	17
2.6.1 特征值和稳定性.....	18
2.6.2 参与因子.....	18
2.6.3 参数灵敏度.....	19
2.7 本章小结.....	20
第 3 章 考虑电压动态过程的小信号模型.....	21

3.1 引言.....	21
3.2 考虑电压动态过程的小信号模型.....	21
3.2.1 电压动态过程对 LCC-HVDC 小信号模型的影响.....	21
3.2.2 模型改进.....	22
3.3 模型验证.....	24
3.3.1 小信号模型验证.....	24
3.3.2 模型的选择对小信号稳定性分析结果的影响.....	27
3.4 本章小结.....	28
第 4 章 交直流混合系统小信号稳定性分析.....	30
4.1 引言.....	30
4.2 LCC-HVDC 系统小信号稳定性分析.....	30
4.2.1 控制参数对系统小信号稳定性的影响.....	30
4.2.2 系统控制参数稳定域.....	33
4.3 交直流混合系统小信号稳定性分析.....	36
4.3.1 系统模态分析.....	36
4.3.2 参数对交直流混合系统小信号稳定性的影响.....	39
4.3.3 交直流混合系统控制参数稳定域.....	46
4.4 本章小结.....	48
第 5 章 总结与展望.....	50
5.1 结论.....	50
5.2 展望.....	51
参考文献.....	52
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	56
致 谢.....	57

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及选题意义

我国能源资源基地与电力负荷中心分布不均衡,西部地区拥有丰富的能源资源,如煤炭、天然气、太阳能等;经济相对发达的中部和东部地区能源资源匮乏,但用电需求大。我国主要的能源基地距离华东负荷中心 800-3000 公里,这促使可实现远距离、大规模送电的高压输电技术在我国迅猛发展。与高压交流输电相比,由于高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)在远距离输电方面有着损耗低、容量大、与电网相连无同步问题等优势,成为解决我国能源与用电负荷中心逆向分布问题、优化能源资源配置、促进经济发展的重要手段,在我国的电力系统联网中起到了重要作用^[1]。在“十三五”期间,我国基本建成了以华北-华东-华中特高压电网为核心网架结构的“三华”电网格局^[2]。

由于晶闸管在工作过程中功率损耗低、控制技术成熟可靠且功率和耐压水平高,所以基于电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)在现阶段的高压直流输电工程中被广泛使用,在交直流电网的输电中扮演着重要的角色^[3,4]。根据国际大电网会议资料显示^[5],截止 2018 年底,全世界已有 155 项高压直流输电工程投入运行,其中 LCC-HVDC 工程占 70%。我国作为世界上运行直流输电工程最多的国家,LCC-HVDC 线路已成为全国大区域联网的重要组成部分,在“西电东送”战略中起着关键性作用,LCC-HVDC 系统的稳定性也直接决定我国区域电网与大电网的稳定运行与否。因此,对含 LCC-HVDC 的交直流混合系统展开稳定性研究就显得尤为重要。

由于电力电子等非线性器件的增多,使得交直流混合系统的结构十分复杂,并且直流系统需要从交流系统吸收无功以维持稳定运行,交直流系统之间存在相互影响,因此直接对其研究不仅难度很高,而且不利于交直流系统稳定性机理的分析。而小信号稳定性分析是在系统的稳定运行点附近通过线性化的方式建立起小信号模型,分析系统在受到小扰动条件下保持稳定运行的能力,已经成为探究交直流混合系统稳定性重要的分析方法^[6]。通过交直流系统的小信号模型进行相应的小信号稳定性分析,不仅能够有效降低非线性电力系统的分析难度,同时这里所说的扰动造成的影响足够小,使得对模型进行线性化也不会影响分析的精度,分析结果可以为交直流系统的稳定运行提供理论指导与支撑^[7]。

小信号稳定性分析在 LCC-HVDC 的控制器参数选取、交直流系统低频振荡分析、阻尼分析中都得到了广泛应用,而且自上个世纪七十年代以来,世界上已

有许多国家的电网都曾发生过多起因系统小信号稳定性失稳而导致系统发生了严重振荡甚至电压崩溃，造成了巨大的经济损失。因此，要想构建坚强可靠的电网，提高系统运行稳定性与抵御风险的能力，建立起准确的交直流系统小信号模型，对系统进行小信号稳定性分析以研究系统稳定机理及运行稳定区域是十分必要且有实用价值的。

1.2 国内外研究现状

近年来国内外学者在含 LCC-HVDC 的交直流混合系统的小信号稳定性方面进行了大量的工作，针对交直流混合系统小信号模型的建模方法、小信号稳定分析方法等问题进行了大量研究，并在许多场景下进行了验证与应用。

1.2.1 小信号模型建模方法

现阶段小信号模型主要通过线性化准稳态模型或通过开关函数模型建立两种方式得到^[8]。准稳态模型计算量小，计算机编程简便，且精度能够满足工程计算的需要^[9]。文献[10]根据小信号理论，建立了直流换流器和直流控制系统的准稳态模型，可用于建立交直流混合系统的小信号模型。基于此，文献[11-13]建立了 LCC-HVDC 的小信号动态模型，并根据所建立的小信号模型，对交直流系统之间的相互作用展开研究。开关函数模型是根据调制理论，通过以不同数值表示换流器工作状态的方式建立模型。文献[14,15]使用开关函数模型建立了换流器的小信号模型以描述交直流系统的交互关系。这种使用开关函数建立的小信号模型虽精度上较准稳态模型有所提高，但其建模复杂，要想提高仿真的准确性就要提高阶数，不利于计算机编程计算，并且在某些暂态情况下，开关函数可能无法准确的表达高压直流系统的动态过程，因此目前大部分研究都采用线性化准稳态模型的方法得到系统小信号模型。

为提高模型的适用性，小信号模型都采用模块化建模思想，先将系统划分成若干子系统分别建模，再联立获得小信号模型，这大大降低了统一建模的复杂性，为分析子系统间的动态交互过程提供了可能^[16]。文献[17]采用模块化建模思想，将系统分为交流系统、直流线路、换流器和控制系统四部分，先将四部分分块建模，再通过模块间的输入输出关系相互连接建立起系统的小信号模型，并验证了模型的正确性。文献[18]为建立多端高压直流输电系统的小信号模型，将模型划分为 LCC-HVDC 和其他部分两个子系统分块建模，并对稳定性进行了判断。这种分块建模的思想有利于进行计算机编程，避免了传统模式分析法在编程过程中可能会出现维数灾，也便于模型加入新元件时的拓展与兼容。

LCC-HVDC 系统小信号模型主要由直流输电线路、LCC 换流器与控制系统的的小信号模型联立得到^[19]。目前在大多数研究中,直流输电线路都被等效成 T 型等值模型或 π 型的级联等值模型^[20]。LCC 换流器作为交直流系统的接口,目前主要存在时域建模^[21,22]与频域建模^[23,24]两种方法:时域建模方法物理意义清晰,适用于交直流系统相互作用分析;频域建模方法是将时域模型转换到频域,以考虑谐波耦合作用,可研究系统内部各次谐波动态耦合机理。文献[25]提出了一种具有结构化和灵活性特点的 LCC-HVDC 系统状态空间的建立方法,根据交直流侧准稳态方程建立了 LCC 换流器模型;文献[26,27]则用小信号理论对逆变侧换流站各典型控制环节进行了简化,建立了相应的小信号模型并对换流站系统进行了全工况小信号稳定性分析。

虽然目前关于小信号模型建模方法已有丰富的研究,但大多数研究为了将直流与交流系统建立联系,描述其外部特性,LCC 换流器普遍从输出电流矢量和直流电流角度建立小信号模型^[28],这导致换流器与交流系统连接时,模型需要进行相应的变换,增大了交直流混合系统建模的复杂性。同时,作为进行系统小信号稳定性分析的基础,小信号模型的建模精度还需进一步提高。

1.2.2 小信号分析方法

目前用于交直流混合系统的小信号分析方法主要包括时域数值积分法、特征值分析法和阻抗分析法^[7]。

时域数值积分法是利用数值积分的方法,针对特定的干扰,积分计算出系统状态量在时间轴上完整的响应。文献[29]利用换流站电磁暂态模型通过数值方法获得了系统的响应特性曲线,从而对系统的稳定性进行了分析。这种方法的优点是能够直观、准确地反映系统在受到干扰后的响应变化,但如果使用这种方法进行小信号稳定性分析,不仅分析时间长,而且无法对系统的阻尼情况与振荡信息等进行全面分析,也无法探究系统失稳的原因,不能揭示交直流系统的稳定性机理。

特征值分析法在电力系统分析中又被称为模态分析法。这种方法来源于现代控制理论,其以交直流系统的状态空间模型为基础,通过选取相应的系统状态变量计算得到系统的状态矩阵,通过系统状态矩阵的特征值揭示整个系统的稳定性。状态矩阵的特征值除了可以表征系统稳定与否,还蕴藏着整个系统的阻尼特性、参与因子、可能出现的振荡模态和特征值灵敏度等信息,通过这些信息可以揭示系统不稳定的原因以及系统振荡模态与系统元件的关系^[30]。同时,运用特征值分析方法还可以给出系统在不同条件下的根轨迹,相较于另外两种分析方法结果更加直观,并且可以量化系统的稳定程度,提出衡量系统可观性与可控性的

指标,为系统控制器的设计和参数选择提供理论依据,并能够为提高系统的运行稳定性提供指导。文献[31]通过特征值分析法计算参与因子,对造成系统不稳定的因素进行了定位,从而提出了提高系统稳定性的方法。特征值分析方法还有着逻辑清晰的优点,十分适合计算机编程开发。综上,特征值分析方法在电力系统中获得了广泛的应用,已经成为小信号稳定性分析领域最成熟的方法。

阻抗分析法又叫频域分析法,这种方法首先将整个系统分成若干独立的子系统,并忽略系统的内部结构信息,只关心系统端口的输入-输出特性,通过建立子系统的等效阻抗模型并利用 Nyquist 稳定性判据判断整个系统的稳定性,同时可以计算系统可能出现的振荡频率以及稳定裕度^[32]。文献[33]建立了 IEEE 14 总线系统的阻抗模型,应用阻抗稳定性判据分析了系统的小信号稳定性,但其在建模过程中只考虑了换流站端口特性,因此无法对交直流系统的相互影响作用进行研究。这种方法由于忽略了子系统内部的结构信息,具有维数低、计算简单快速的优点,但是这种忽略装置内部结构的方法,牺牲了分析结果的准确性来换取计算的高效性,不利于对于内部装置的分析,难以在复杂的交直流混合系统中得到应用。

1.2.3 小信号稳定性分析的应用

小信号稳定性分析在电力系统中应用广泛,国内外众多学者已从直流控制系统对稳定性影响和交直流系统间的相互影响等方面展开了研究。

用小信号稳定性分析方法分析直流控制系统,可以探究控制参数变化对系统特征根轨迹的影响,从而得到控制参数的稳定域。文献[19]建立了定电压控制与预测型定关断角控制的小信号模型,并对比了两种控制方式对 LCC-HVDC 系统稳定性的影响。文献[34]建立了 LCC-HVDC 系统模型,分析了直流系统 PI 控制参数与直流电流的关系。文献[35]对含控制系统的 HVDC 系统进行了小信号建模,用特征根轨迹对不同控制参数对系统小信号稳定性的影响进行了研究,并提出了提高系统稳定性的参数优化方法。

由于小信号稳定性分析方法中的特征值分析方法是对全系统进行建模分析,因此可以用来分析交直流系统间的相互影响作用。通过分析状态矩阵的特征值变化趋势,可以获得对系统稳定性影响最大的主导模态,根据该模态下的参与因子、阻尼比等信息即可确定交直流系统中各状态变量的贡献程度与作用关系。文献[36]使用模态分析法研究了交流系统强度 SCR 对直流输电系统小信号稳定性的影响,得出弱交流状态下直流输电系统更容易失稳,并给出了引起系统失稳的主导模态及参数调整方法。文献[37]使用特征值分析法对含发电机的高压直流输电系统进行了分析,并提出了衡量电压稳定性的电压稳定相关比。文献[38]对 4 机

11 节点的交直流混合系统进行了小信号建模,研究了直流加入后对于混合系统振荡模态的影响,得到了适当提升直流输送功率比例有利于提高系统稳定性的结论。文献[39]对 Kundur 两区四机系统进行了小信号稳定性分析,计算了 LCC-HVDC 采用不同策略总线时的阻尼特性与振荡幅度,结果表明相较于 HVAC, HVDC 线路阻尼振荡更快,运行模式更稳定。

1.2.4 需要解决的问题

目前大部分的交直流混合系统小信号建模与稳定性研究中,主要存在以下两个问题:(1)传统的小信号模型在用来进行小信号稳定性分析时,由于模型精度不高,可能会在系统稳定边界附近得到错误结论,无法对提高系统稳定性提供准确的指导;(2)大部分研究在分析交直流混合系统的小信号稳定性时会把发电机等效成电压源,着重研究直流两侧控制系统对电力系统稳定性的影响,这种简化后的分析结果虽有一定的指导价值,但由于忽略了发电机内部的动态过程,导致所建系统的小信号模型无法完整描述整个交直流系统的交互过程,在一定程度上降低了分析结果的准确性,也无法完整揭示交直流混合系统的稳定性机理。因此,建立包含发电机的交直流混合系统小信号模型,提高小信号模型的精度,对于研究系统小信号稳定性,探究交直流系统稳定机理有重要意义。

1.3 本文的主要工作

建立准确的小信号模型是进行交直流混合系统小信号稳定性分析的基础,本文的主要研究工作是对高精度的交直流混合系统小信号建模方法进行研究与应用,本文的研究思路如图 1-1 所示,具体研究工作如下:

(1)详细论述交直流混合系统的小信号建模与分析方法。采用模块化建模思想将交直流混合系统分为交流和直流两个子系统分别建模,再将子系统模型联立化简得到交直流系统的小信号模型(SSM)。交流子系统中建立同步发电机、励磁系统和交流网络的模型,其中交流网络模型通过节点注入功率与电压幅值相角的关系建立,以简化建模过程;直流子系统包含直流线路、换流器、触发角控制器与锁相环模型,换流器选用功率与电压相量作为交直流的连接变量,增强模型的通用性。最后介绍小信号稳定性分析中常用的特征值分析法,为后续系统稳定性分析提供理论基础。

(2)建立考虑电压动态过程的小信号模型。首先研究电压动态过程对 SSM 模型的影响,为提高模型精度向系统的小信号模型中引入考虑电压动态过程的状态变量与方程,并对换流器内部角度进行相应修正,建立考虑电压动态过程的小

信号模型(SSM-CVV)。然后将 SSM-CVV 模型和 SSM 模型的计算结果与 PSCAD 仿真结果进行对比,验证 SSM-CVV 模型的正确性与模型精度。最后采用根轨迹分析法,研究采用上述两种模型对系统小信号稳定性分析结果准确性的影响,为系统小信号稳定性分析提供模型基础。

(3) 采用考虑电压动态过程的小信号模型分析系统的小信号稳定性。分别对 LCC-HVDC 系统与交直流混合系统进行小信号稳定性分析,研究交直流系统的相互作用,采用根轨迹法与参与因子分析法探究参数对系统稳定性的影响;并以最小阻尼比为指标,计算系统的控制参数稳定域,为提高系统运行稳定性提供指导。

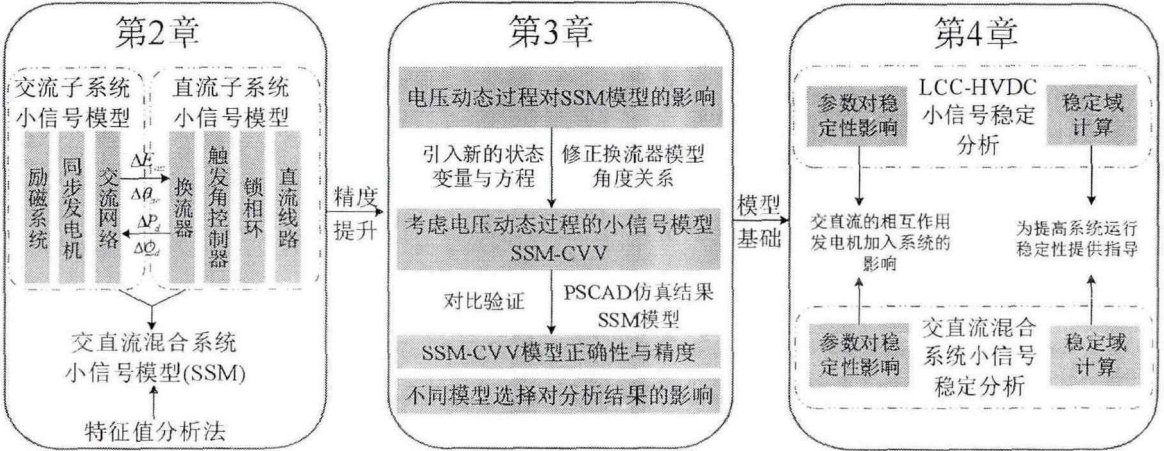


图 1-1 本文的研究思路

第 2 章 交直流混合系统小信号建模及分析方法

2.1 引言

小信号稳定性是指在遭受到小扰动后系统仍能保持稳定的能力,这里的扰动足够小,使得电力系统中的各状态变量仍位于原平衡点附近,因而可以在平衡点处将非线性系统的状态空间模型线性化,得到系统在平衡点的小信号模型。本文采用模块化建模思想,将交直流混合系统分为交流子系统与直流子系统两部分,分别对子系统进行小信号建模,再将子系统合并联立得到混合系统的小信号模型。模型建立后,利用特征值分析法对状态矩阵进行模态分析,可以得到系统小信号稳定性的相关信息。

2.2 小信号模型的建立

电力系统的动态响应一般可以用如下的微分-代数方程组来描述:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ 0 = g(x, y) \end{cases} \quad (2-1)$$

其中, x 为可以完整描述系统运动的状态变量向量; y 为系统的运行变量向量; $f(x, y)$ 为描述系统的微分方程组; $g(x, y)$ 为相应的代数方程组。

设 (x_0, y_0) 为系统的平衡点,则在平衡点处满足:

$$\dot{x}_0 = f(x_0, y_0) \quad (2-2)$$

在平衡点处施加一小扰动 $x=x_0+\Delta x$, $y=y_0+\Delta y$, 则有:

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (y_0 + \Delta y)] \quad (2-3)$$

由于扰动足够小,可以将非线性微分方程组 $f(x, y)$ 用泰勒级数展开线性表示,忽略其二阶与高阶项,可得微分方程组的线性化模型:

$$\Delta \dot{x} = A_m \Delta x + B_m \Delta y \quad (2-4)$$

同理可得代数方程组的线性化模型:

$$0 = C_m \Delta x + D_m \Delta y \quad (2-5)$$

其中, $A_m = \partial f / \partial x|_{x=x_0, y=y_0}$, $B_m = \partial f / \partial y|_{x=x_0, y=y_0}$, $C_m = \partial g / \partial x|_{x=x_0, y=y_0}$, $D_m = \partial g / \partial y|_{x=x_0, y=y_0}$ 。

式(2-4)与式(2-5)即为系统的小信号模型,当 D_m 为非奇异矩阵时,将两式联

立消去运行变量可得系统状态方程：

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (2-6)$$

其中，状态矩阵 $\mathbf{A} = \mathbf{A}_m - \mathbf{B}_m (\mathbf{D}_m)^{-1} \mathbf{C}_m$ ，对其进行相应的小信号稳定性分析，即可得到系统稳定性相关信息。

2.3 交流子系统小信号模型

2.3.1 同步发电机

发电机作为电力系统中最重要的一部分，是一种集电磁感应与机械旋转运动于一体的元件，因此发电机模型十分复杂。目前大部分发电机的建模都采用二阶模型，这种模型认为发电机电势恒定，仅研究发电机的转子运动而忽略了发电机的电磁暂态过程，无法完整研究发电机的内部动态过程，因此本文采用可以体现电磁暂态过程的同步发电机四阶模型，模型基于如下假设^[40]：

(1) 忽略定子中 d 绕组与 q 绕组的暂态过程，即定子电压方程中磁链的导数为 0；

(2) 忽略转子 d 轴与 q 轴的次暂态过程，即忽略 D 绕组与 Q 绕组；

(3) 定子电压方程中的同步转速 $\omega \approx 1$ (p.u.)，即在转速变化不大的过渡过程中，其引起的误差很小，从而使方程可以线性化。

同步发电机的四阶微分方程包括转子运动方程与转子电磁暂态方程，如式(2-7)所示。

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_0 (\omega_r - 1) \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{T_j} [P_T - P_e - K_D (\omega_r - 1)] \\ \dot{E}_q' = -\frac{1}{T_d'} [E_q' + I_d (x_d - x_d')] + \frac{1}{T_d'} E_f \\ \dot{E}_d' = -\frac{1}{T_q'} [E_d' - I_q (x_q - x_q')] \end{cases} \quad (2-7)$$

其中， δ 为发电机功角； ω_0 与 ω_r 分别为同步转速与发电机的相对转速； T_j 为发电机惯性时间常数，表征发电机转子的机械惯性； P_T 为原动机输出到发电机的机械功率，一般认为小信号分析过程中机械功率基本不变； P_e 为发电机输出的电磁功率； K_D 为发电机系统阻尼系数； T_d' 与 T_q' 分别为直轴与交轴暂态时间常数。

代数方程包括定子电压方程与发电机输出功率方程，如式(2-8)所示。

$$\begin{cases} I_d = \frac{E'_q - U_q}{x_d} = \frac{E'_q}{x_d} - \frac{U_q}{x_d} \cos(\delta - \theta) \\ I_q = \frac{-E'_d + U_d}{x_q} = -\frac{E'_d}{x_q} + \frac{U_d}{x_q} \sin(\delta - \theta) \\ P_G = U_d I_d + U_q I_q = I_d I_q x'_q - I_d I_q x'_d + I_q E'_q + I_d E'_d \\ Q_G = U_q I_d - U_d I_q = -I_d^2 x'_d - I_q^2 x'_q + I_d E'_q - I_q E'_d \end{cases} \quad (2-8)$$

其中, I_d 与 I_q 分别为直轴与交轴电流; E'_d 与 E'_q 分别为直轴与交轴暂态电动势; x'_d 与 x'_q 分别为直轴与交轴等效暂态电抗; U_t 为发电机端电压; θ 为端电压相角; P_G 与 Q_G 分别为发电机输出的有功和无功功率。

将发电机微分方程与代数方程线性化即可得到发电机小信号模型:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega_r \\ \Delta \dot{\omega}_r = \frac{1}{T_j} (\Delta P_T - \Delta P) - \frac{K_D}{T_j} \Delta \omega_r \\ \Delta \dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_d} [\Delta E'_q + \Delta I_d (x_d - x'_d)] + \frac{1}{T'_d} \Delta E_f \\ \Delta \dot{E}'_d = -\frac{1}{T'_q} [\Delta E'_d - \Delta I_q (x_q - x'_q)] \end{cases} \quad (2-9)$$

$$\begin{cases} \Delta I_d = \frac{\partial I_d}{\partial U_t} \Delta U_t + \frac{\partial I_d}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial I_d}{\partial E'_q} \Delta E'_q + \frac{\delta I_d}{\delta E'_d} \Delta E'_d + \frac{\partial I_d}{\partial \delta} \Delta \delta \\ \Delta I_q = \frac{\partial I_q}{\partial U_t} \Delta U_t + \frac{\partial I_q}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial I_q}{\partial E'_q} \Delta E'_q + \frac{\delta I_q}{\delta E'_d} \Delta E'_d + \frac{\partial I_q}{\partial \delta} \Delta \delta \\ \Delta P_G = \frac{\partial P_G}{\partial I_d} \Delta I_d + \frac{\partial P_G}{\partial I_q} \Delta I_q + \frac{\partial P_G}{\partial E'_q} \Delta E'_q + \frac{\delta P_G}{\delta E'_d} \Delta E'_d \\ \Delta Q_G = \frac{\partial Q_G}{\partial I_d} \Delta I_d + \frac{\partial Q_G}{\partial I_q} \Delta I_q + \frac{\partial Q_G}{\partial E'_q} \Delta E'_q + \frac{\delta Q_G}{\delta E'_d} \Delta E'_d \end{cases} \quad (2-10)$$

2.3.2 励磁系统

励磁系统向发电机输出励磁功率,起着调节、稳定发电机端电压的作用。虽然励磁系统种类众多,结构上也存在着很大的差别,但它们的基本原理都是根据发电机端电压的变化来改变励磁电压的输出从而控制发电机,其简化框图如图 2-1 所示。

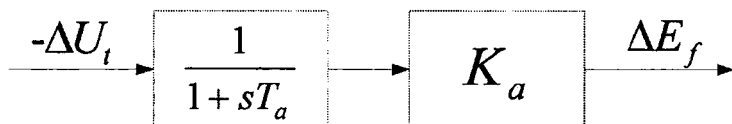


图 2-1 典型励磁系统模型框图

根据框图可以列出发电机端电压变化量与励磁输出电压变化量的关系：

$$\Delta E_f = -\frac{K_a}{1+sT_a} \Delta U_t \quad (2-11)$$

其中， E_f 为励磁输出电压； K_a 为励磁系统增益； T_a 为励磁时间常数。

对式(2-11)进行拉普拉斯反变换，即可得到励磁系统的小信号模型：

$$\Delta \dot{E}_f = -\frac{K_a}{T_a} \Delta U_t - \frac{1}{T_a} \Delta E_f \quad (2-12)$$

2.3.3 交流网络

交流网络中包括输电线路、变压器和无功补偿设备等电气元件，如果将这些元件的动态特性都考虑进模型，那么随着网络规模的增大，元件数量快速增加，模型的计算量将成倍增加，甚至发生维数灾，因此考虑它们的动态特性是不现实的。由于交流网络元件考虑基频特性的数学模型就可以满足分析精度，现阶段传统小信号模型都采用式(2-13)的形式对交流网络建模，得到网络中各节点电流与电压的关系。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_x \\ \Delta I_y \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

其中， I_x 和 I_y 为 xy 坐标系下的节点注入电流向量； U_x 和 U_y 为 xy 坐标系下的节点电压向量。

使用这种形式建立起的小信号模型，需要把原相量形式的节点电压方程分解到 x 、 y 坐标轴上，即得到幅值-相角形式的相量方程后还需经坐标变换才能得到相应的小信号模型，模型建立比较复杂。且对于一些元件来说，求取其出口电流的表达式较为困难，不利于建立式中的小信号模型。

由于电力系统中元件的准稳态数学模型大都采用幅值-相角形式的相量方程表示，如果采用节点注入功率分量与电压的幅值相角来描述系统的小信号模型，那么就可以通过直接线性化元件的准稳态模型得到相应的小信号模型，如式(2-14)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_a \\ \Delta Q_a \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta \theta_a \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

其中, P_a 和 Q_a 分别为节点注入的有功和无功功率, 也具有正交的性质; U_a 和 θ_a 分别为节点电压的幅值和相角。

这种形式的小信号模型建立过程比较简单, 直接线性化元件准稳态模型即可得到, 不再需要坐标变换。模型右侧的系数矩阵 J 为线路对应的雅克比矩阵, 可直接从潮流计算中取得, 进一步简化了模型的建立, 便于计算机建模。同时, 采用节点注入功率的形式使得模型的物理意义更加明确, 也便于和发电机、直流系统建立起联系, 有利于交直流混合系统的建模。

2.4 直流子系统小信号模型

2.4.1 LCC-HVDC 系统结构

由于 LCC-HVDC 技术在远距离、大容量输电的场合已获得广泛应用, 本文选择以 LCC-HVDC 系统为研究对象。系统主要分为直流线路、换流器、触发角控制器和锁相环四部分, 系统结构参考 CIGRE 高压直流标准测试系统, 如图 2-2 所示。采用双端单极大地回线结构, 换流站采用基于晶闸管器件的 12 脉动换流器, 直流系统的控制策略为整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定关断角控制。

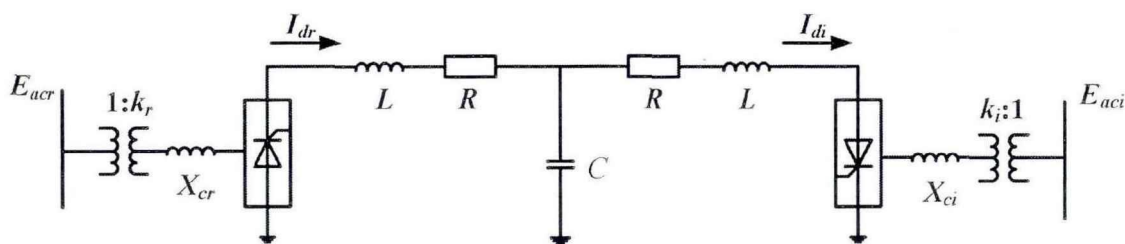


图 2-2 LCC-HVDC 系统结构

图中, 交流侧电气量均用单相值表示, 各变量下标“r”代表整流侧, “i”代表逆变侧; E_{ac} 为换流器换流母线电压有效值; k 为换流变压器变比; X_c 为换流变压器的等效换相电抗; 直流输电线路采用 T 形等效电路, L 为直流线路的等效电抗, R 代表直流线路等效电阻, C 是直流线路等效对地电容; I_d 为直流电流, 正方向如图中箭头所示。

2.4.2 直流线路

直流线路是连接整流站与逆变站的输电线路, 根据图 2-2, 可列出直流线路的准稳态模型为:

$$\begin{cases} L\dot{I}_{dr} = V_{dr} - V_c - RI_{dr} \\ L\dot{I}_{di} = V_c - V_{di} - RI_{di} \\ C\dot{V}_c = I_{dr} - I_{di} \end{cases} \quad (2-15)$$

其中, V_{dr} 与 V_{di} 分别为整流站与逆变站出口的直流电压, V_c 为直流线路等效电容电压。

将式(2-15)线性化即可得到直流线路的小信号模型:

$$\begin{cases} \Delta\dot{I}_{dr} = -\frac{R}{L}\Delta I_{dr} - \frac{1}{L}\Delta V_c + \frac{1}{L}\Delta V_{dr} \\ \Delta\dot{I}_{di} = -\frac{R}{L}\Delta I_{di} + \frac{1}{L}\Delta V_c - \frac{1}{L}\Delta V_{di} \\ \Delta\dot{V}_c = \frac{1}{C}\Delta I_{dr} - \frac{1}{C}\Delta I_{di} \end{cases} \quad (2-16)$$

2.4.3 换流器

换流器是实现交流与直流转换的设备, 当触发角 $\alpha < 90^\circ$ 时, 换流器工作在整流状态; 当触发角 $\alpha > 90^\circ$ 时, 换流器工作在逆变状态。作为交直流系统的接口, 在换流器中选用注入功率与电压相量作为交直流的连接变量, 交流系统对直流系统的影响通过交流侧电压幅值、相角的形式表现, 而直流系统对交流系统的影响则用直流系统传输的有功、无功功率来体现。这种建模方式物理意义清晰明确, 并且可以方便直流与交流系统小信号模型的联立。

由于换流器准稳态模型中各量是在一个工频周期内对应的平均值, 在建立其准稳态模型时有如下假设^[40]:

- (1) 交流侧电压三相对称, 为工频正弦波;
- (2) 换流变压器的等效换相电抗三相平衡, 且忽略内电阻;
- (3) 平波电抗极大, 直流电流没有纹波;
- (4) 换流阀为理想器件, 且等间距触发。

整流侧换流器准稳态模型为:

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_r E_{acr} \cos \alpha_r - \frac{3}{\pi} n X_{cr} I_{dr} \\ P_{dr} = V_{dr} I_{dr} \\ Q_{dr} = I_{dr} \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_r E_{acr} \right)^2 - V_{dr}^2} \\ \alpha_r = \alpha'_r + \theta_{acr} - \theta_{PLLr} \end{cases} \quad (2-17)$$

式中：\$n\$ 为换流器中串联的换流桥数，在 12 脉动换流器中 \$n=2\$；\$\alpha_r\$ 为整流侧实际触发角；\$P_{dr}\$ 和 \$Q_{dr}\$ 分别为整流侧交流电网向换流器注入的有功、无功功率，以流入换流器为正方向；\$\alpha'_r\$ 为整流侧控制器输出的触发角指令值；\$\theta_{acr}\$ 为换流变压器网侧母线电压相位；\$\theta_{PLLr}\$ 为整流侧锁相环输出相位。

将式(2-17)线性化可得整流侧小信号模型：

$$\begin{cases} \Delta V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_r \cos \alpha_r \Delta E_{acr} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_r E_{acr} \sin \alpha_r \Delta \alpha_r - \frac{3}{\pi} n X_{cr} \Delta I_{dr} \\ \Delta \alpha_r = \Delta \alpha'_r + \Delta \theta_{acr} - \Delta \theta_{PLLr} \\ \Delta P_{dr} = \Delta V_{dr} I_{dr} + V_{dr} \Delta I_{dr} \\ \Delta Q_{dr} = N_{dr} \Delta I_{dr} + \frac{(nk_r)^2}{N_{dr}} I_{dr} E_{acr} \Delta E_{acr} - \frac{I_{dr} V_{dr}}{N_{dr}} \Delta V_{dr} \end{cases} \quad (2-18)$$

式中：\$N_{dr} = \sqrt{\left(3\sqrt{2} / \pi \cdot nk_r E_{acr} \right)^2 - V_{dr}^2}\$。

逆变侧换流器方程用\$\gamma\$表示直流电压，准稳态模型为^[8]：

$$\begin{cases} V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_i E_{aci} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} n X_{ci} I_{di} \\ \cos \gamma = \cos \beta_i + \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}} \\ \quad = -\cos \alpha_i + \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}} \\ P_{di} = V_{di} I_{di} \\ Q_{di} = -I_{di} \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_i E_{aci} \right)^2 - V_{di}^2} \\ \alpha_i = \alpha'_i + \theta_{aci} - \theta_{PLL i} \end{cases} \quad (2-19)$$

式中：\$\gamma\$ 为逆变侧关断角；\$\alpha_i\$ 为逆变侧实际触发角；\$\beta_i\$ 为逆变侧触发超前角；\$P_{di}\$ 与 \$Q_{di}\$ 分别为逆变侧交流电网向换流器注入的有功、无功功率，以流出换流器为

正方向； α'_i 为逆变侧控制器输出的触发角指令值； θ_{aci} 为换流变压器网侧母线电压相位； θ_{PLLi} 为逆变侧锁相环输出相位。

将式(2-19)线性化可得逆变侧小信号模型：

$$\begin{cases} \Delta V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}nk_i \cos \gamma \Delta E_{aci} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi}nk_i E_{aci} \sin \gamma \Delta \gamma - \frac{3}{\pi}nX_{ci} \Delta I_{di} \\ \Delta \alpha_i = \Delta \alpha'_i + \Delta \theta_{aci} - \Delta \theta_{PLLi} \\ -\sin \gamma \Delta \gamma = \sin \alpha_i \Delta \alpha_i + \frac{\sqrt{2}X_{ci}}{k_i E_{aci}} \Delta I_{di} - \frac{\sqrt{2}X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}^2} \Delta E_{aci} \\ \Delta P_{di} = \Delta V_{di} I_{di} + V_{di} \Delta I_{di} \\ \Delta Q_{di} = -N_{di} \Delta I_{di} - \frac{(nk_i)^2}{N_{di}} I_{di} E_{aci} \Delta E_{aci} + \frac{I_{di} V_{di}}{N_{di}} \Delta V_{di} \end{cases} \quad (2-20)$$

式中： $N_{di} = \sqrt{\left(3\sqrt{2} / \pi \cdot nk_i E_{aci}\right)^2 - V_{di}^2}$ 。

2.4.4 触发角控制器

触发角控制器主要由起滤波作用的一阶测量环节与PI控制器组成。其控制量都是最终作用于直流两侧换流器的触发角，使其按预先设定的整定值自动调节，从而保证整个直流系统处于稳定运行状态。根据触发角控制器相应的传递函数框图就能列出其对应的方程。

(1) 定电流控制

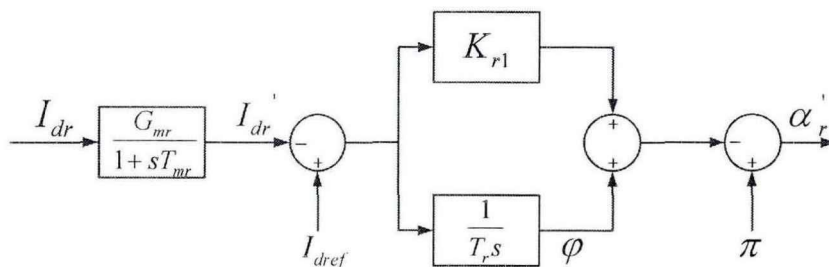


图 2-3 定电流控制框图

定电流控制器结构如图 2-3 所示，由自动控制理论可得其准稳态模型为：

$$\begin{cases} T_{mr} \dot{I}'_{dr} = G_{mr} I_{dr} - I'_{dr} \\ \dot{\phi} = \frac{1}{T_r} (I_{dref} - I'_{dr}) \\ \alpha'_r = \pi - \phi - K_{r1} (I_{dref} - I'_{dr}) \end{cases} \quad (2-21)$$

式中： I_{dr} 为整流侧直流线路电流； I'_{dr} 为经一阶测量环节滤波后的直流电流； T_{mr} 与 G_{mr} 分别为一阶测量环节的时间常数与增益系数； I_{ref} 为定电流控制器的参考

值； ϕ 为PI控制器中积分环节的输出量； T_r 与 K_{r1} 分别为PI控制器的积分时间常数与比例增益； α_r' 为控制器输出的触发角指令值。

将式(2-21)线性化可得定电流控制器小信号模型：

$$\begin{cases} \Delta \dot{I}'_{dr} = \frac{G_{mr}}{T_{mr}} \Delta I_{dr} - \frac{1}{T_{mr}} \Delta I'_{dr} \\ \Delta \dot{\phi} = \frac{1}{T_r} (\Delta I_{dref} - \Delta I'_{dr}) \\ \Delta \alpha'_r = -\Delta \phi - K_{r1} (\Delta I_{dref} - \Delta I'_{dr}) \end{cases} \quad (2-22)$$

(2) 定关断角控制

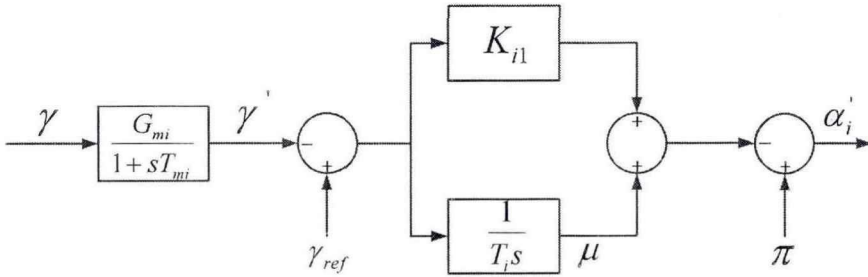


图 2-4 定关断角控制框图

定电流控制器结构如图 2-4 所示，可得其准稳态模型为：

$$\begin{cases} T_{mi} \dot{\gamma}' = G_{mi} \gamma - \gamma' \\ \dot{\mu} = \frac{1}{T_i} (\gamma_{ref} - \gamma') \\ \alpha'_i = \pi - \mu - K_{i1} (\gamma_{dref} - \gamma') \end{cases} \quad (2-23)$$

式中： γ 为逆变侧关断角； γ' 为经一阶测量环节滤波后的关断角； T_{mi} 与 G_{mi} 分别为一阶测量环节的时间常数与比例增益系数； γ_{ref} 为定关断角控制器输入的参考值，一般为 0.2618； μ 为PI控制器中积分环节的输出量； T_i 与 K_{i1} 分别为PI控制器的积分时间常数与比例增益； α'_i 为控制器输出的触发角指令值。

将式(2-23)线性化可得定关断角控制器小信号模型：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\gamma}' = \frac{G_{mi}}{T_{mi}} \Delta \gamma - \frac{1}{T_{mi}} \Delta \gamma' \\ \Delta \dot{\mu} = \frac{1}{T_i} (\Delta \gamma_{ref} - \Delta \gamma') \\ \Delta \alpha'_i = -\Delta \mu - K_{i1} (\Delta \gamma_{dref} - \Delta \gamma') \end{cases} \quad (2-24)$$

2.4.5 锁相环

整流和逆变侧换流站中都装有锁相环（PLL）装置，以同步交流母线电压相位。锁相环通过测量交流母线电压相角的变化得到相位误差信号，经一个负反馈信号通路产生触发角的修正量，最终实现相位锁定。锁相环主要由三个部分组成：误差计算器、PI 控制器与电压源控制振荡器，其结构框图如图 2-5 所示。

由 PLL 框图可得准稳态方程为^[41]：

$$\begin{cases} \dot{\phi}_{PLLr(i)} = K_{lr(i)} (\theta_{acr(i)} - \theta_{PLLr(i)}) \\ \dot{\theta}_{PLLr(i)} = \phi_{PLLr(i)} + K_{pr(i)} (\theta_{acr(i)} - \theta_{PLLr(i)}) \end{cases} \quad (2-25)$$

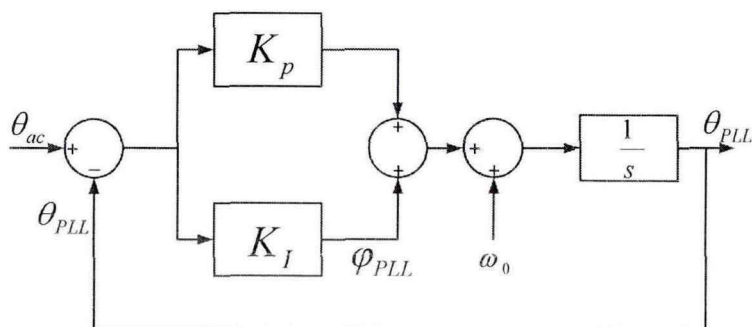


图 2-5 锁相环结构图

式中：下标 r 与 i 分别表示整流侧与逆变侧； ϕ_{PLL} 为锁相环 PI 控制器中积分环节的输出； θ_{ac} 为换流变压器网侧母线电压相位； ω_0 为换流变压器网侧母线电压角频率； K_p 与 K_i 分别为 PI 控制器比例增益与积分增益； θ_{PLLr} 为锁相环输出相位。

将式(2-25)线性化可得锁相环小信号模型：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\phi}_{PLLr(i)} = K_{lr(i)} (\Delta \theta_{acr(i)} - \Delta \theta_{PLLr(i)}) \\ \Delta \dot{\theta}_{PLLr(i)} = \Delta \phi_{PLLr(i)} + K_{pr(i)} (\Delta \theta_{acr(i)} - \Delta \theta_{PLLr(i)}) \end{cases} \quad (2-26)$$

2.5 交直流混合系统小信号模型

本文采用分块建模的方法，将交直流混合系统分为交流与直流两个子系统，首先建立子系统的小信号模型，再将子系统模型联立化简得到混合系统小信号模型（small signal model, SSM）。

由前两节分析可知，式(2-9)、(2-10)、(2-12)和(2-14)组成了交流系统小信号模型，其化简后的形式为：

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_a = A_a \Delta x_a + B_a \Delta y_a \\ \Delta S_g = C_g \Delta x_a + D_g \Delta y_a \\ \Delta S_a = J \Delta y_a \end{cases} \quad (2-27)$$

式中, 状态变量 $x_a = [\delta, \omega_r, E_q', E_d', E_f]^T$; 代数变量为系统交流网络节点电压的幅值与相角, 即 $y_a = [U_1, \theta_1, U_2, \theta_2, \dots, U_n, \theta_n]^T$, n 为交流系统节点数; A_a 、 B_a 、 C_g 、 D_g 和 J 分别为对应的系数矩阵; S_g 与 S_a 分别为发电机输出与节点注入的有功、无功功率向量。

式(2-16)、(2-18)、(2-20)、(2-22)、(2-24)和(2-26)共同组成了直流系统的小信号模型, 其化简后的形式为:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x}_d = A_d \Delta x_d + B_d \Delta y_d \\ \Delta S_d = C_d \Delta x_d + D_d \Delta y_d \end{cases} \quad (2-28)$$

式中, 状态变量 $x_d = [I_{dr}, I_{dr}', \varphi, \varphi_{PLLr}, \theta_{PLLr}, I_{di}, \gamma', \mu, \varphi_{PLLl}, \theta_{PLLl}, V_c]^T$; 代数变量为与直流系统相连的两侧换流母线电压幅值与相角, 即 $y_d = [E_{acr}, \theta_{acr}, E_{aci}, \theta_{aci}]^T$; A_d 、 B_d 、 C_d 和 D_d 分别为对应的系数矩阵; S_d 为直流线路两侧换流器与交流系统交换的有功、无功功率, 即 $S_d = [P_{dr}, Q_{dr}, P_{di}, Q_{di}]^T$ 。

将式(2-27)与式(2-28)联立并根据功率守恒化简消去中间变量后得到的混合系统小信号模型 SSM 形式如下:

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A_m \Delta x + B_m \Delta y \\ 0 = C_m \Delta x + D_m \Delta y \end{cases} \quad (2-29)$$

其中, 状态变量 $x = [\delta, \omega_r, E_q', E_d', E_f, I_{dr}, I_{dr}', \varphi, \varphi_{PLLr}, \theta_{PLLr}, I_{di}, \gamma', \mu, \varphi_{PLLl}, \theta_{PLLl}, V_c]^T$; 由于直流系统中的代数变量为相应换流母线节点的交流电压幅值相角, 因此混合系统的代数变量即为交流网络节点电压的幅值与相角, 即 $y = [U_1, \theta_1, U_2, \theta_2, \dots, U_n, \theta_n]^T$, n 为系统节点数; A_m 、 B_m 、 C_m 和 D_m 分别为化简后的系数矩阵。

以上给出了交直流混合系统小信号模型的建模方法, 以及状态变量与代数变量的选择。对于含多发电机或多直流的系统, 只需采用分块建模的方法, 把每台发电机、每条直流线路以及交流网络看做不同的子系统, 首先对子系统进行相应的小信号建模, 再将各子系统合并起来即可得到交直流混合系统小信号模型。

2.6 特征值分析法

在小信号分析中, 特征值分析法可以用来研究系统在遭受小扰动后的动态特性, 也被称为模态分析法。特征值分析法需要得到系统的状态矩阵, 对状态矩阵进行相应的分析即可得到系统稳定性、可能出现的振荡频率、阻尼比等信息, 同时还可以研究各量对系统稳定性的影响。

2.6.1 特征值和稳定性

将交直流混合系统的小信号模型式(2-29)消去代数变量即可得如式(2-6)所示的系统状态方程，其中， A 就是系统的特征矩阵。设系统共有 k 个状态变量，则 A 是一个 $k \times k$ 的方阵，由矩阵 A 的特征值构成的对角矩阵 $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k]^T$ 。

设矩阵 A 的第 i 个特征值为：

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (2-30)$$

若特征值仅含实部($\omega_i=0$)，则该特征值对应一个非振荡模式；若特征值为复数($\omega_i \neq 0$)，则该特征值对应一个振荡模式，且在根轨迹图中会以共轭特征值的形式成对出现。

根据李雅普诺夫第一法，系统的稳定性是由 A 的特征值所决定的：

(1) 当特征矩阵所有的特征值实部都小于 0 时，系统是稳定的，且若特征值仅含实部则系统渐进稳定，若特征值含复数则系统振荡稳定；

(2) 当特征矩阵中存在至少一个含正实部的特征值时，系统是不稳定的。

除了稳定性信息，特征值中还蕴含着振荡频率与阻尼比信息。特征值实部 σ 体现了系统在振荡过程中的阻尼特性，虚部 ω 则给出了系统的振荡频率。

特征值 λ_i 对应的振荡频率 (Hz) 为：

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (2-31)$$

对应的阻尼比为：

$$\zeta_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2-32)$$

阻尼比代表着系统振荡衰减的快慢，当 $\zeta_i > 0$ 时，系统是稳定的，且 ζ_i 的值越大，系统的稳定速度越快，小信号稳定性越强；当 $\zeta_i = 0$ 时，系统处于稳定边界；当 $\zeta_i < 0$ 时，系统是不稳定的。

2.6.2 参与因子

矩阵 A 的左特征向量矩阵 Ψ 与右特征向量矩阵 Φ 满足：

$$\begin{cases} \Psi A = \Lambda \Psi \\ A \Phi = \Phi \Lambda \end{cases} \quad (2-33)$$

其中， $\Psi = [\psi_1^T, \psi_2^T, \dots, \psi_k^T]^T$ ； $\Phi = [\varphi_1^T, \varphi_2^T, \dots, \varphi_k^T]^T$ ； ψ_i 和 φ_i 分别为特征值 λ_i 对应的左右特征向量。

左特征向量 ψ_i 表示的是系统各状态变量对第 i 个模式的影响程度，反映了模式的可控性；右特征向量 φ_i 表示的是在第 i 个模式中系统各状态变量的活跃程度，

反映了模式的能观性^[42]。

为综合衡量状态变量和模式之间的相互影响程度，把左特征向量矩阵 Ψ 和右特征向量矩阵 Φ 结合起来获得参与矩阵 P ：

$$P = [P_1 \ P_2 \ \cdots \ P_k] \quad (2-34)$$

其中，

$$P_i = [p_{1i} \ p_{2i} \ \cdots \ p_{ki}]^T = [\phi_{1i}\psi_{i1} \ \phi_{2i}\psi_{i2} \ \cdots \ \phi_{ki}\psi_{ik}]^T \quad (2-35)$$

参与矩阵 P 中的元素 $p_{ji} = \phi_{ji}\psi_{ij}$ 即为参与因子，它表示第 i 个模式中第 j 个状态变量的参与程度，是一个反映能观性与可控性的综合指标。根据参与因子的大小，可以确定在某一模态下起主导作用的状态变量或系统元件；同时通过研究主导模态失稳前后参与因子的相对变化，就可以找到引起系统失稳的主要原因。

2.6.3 参数灵敏度

在实际运行与分析中，人们更关心控制参数或运行参数对系统小信号稳定性的影响，以及调整什么参数可以有效改善系统稳定性。但状态矩阵 A 中的元素 a_{ij} 是由系统中的多个运行参数和控制参数共同决定的，直接求取特征值对矩阵元素的灵敏度无法判断参数与系统稳定的相关性^{[43],[44]}，因此需要研究特征值对参数的灵敏度。

对于交直流混合系统小信号模型(2-29)，令 $\phi_{ia} = -(D_m)^{-1}C_m\phi_i$ ， $\psi_{ia} = -\psi_i B_m(D_m)^{-1}$ ，根据左、右特征向量的性质则有：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_{ia} \end{bmatrix} = \lambda_i \begin{bmatrix} \phi_i \\ 0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \psi_i & \psi_{ia} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{bmatrix} = \lambda_i \begin{bmatrix} \psi_i & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2-36)$$

设要研究的参数为 k ，式(2-36)中各元素均是 k 的函数，因此将式(2-36)对 k 求导并化简可得：

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial k} = \frac{\begin{bmatrix} \psi_i & \psi_{ia} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial A_m}{\partial k} & \frac{\partial B_m}{\partial k} \\ \frac{\partial C_m}{\partial k} & \frac{\partial D_m}{\partial k} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_{ia} \end{bmatrix}}{\psi_i \phi_i} \quad (2-37)$$

式(2-37)即为特征值 λ_i 对参数 k 的灵敏度。由于一个特征值对应着一种模态，式(2-37)所表示的参数灵敏度也就反映着参数 k 对于对应模态的影响大小，灵敏

度绝对值越大, k 变化对模态的影响越大, 对该模态下的系统稳定性影响也就越大。通过比较参数灵敏度的大小, 就可以确定哪种参数在系统稳定性中起主要作用, 为改善系统稳定性提供指导。

2.7 本章小结

本章首先介绍了小信号模型的建模方法, 采用模块化建模的思想, 将交直流混合系统分为交流子系统和直流子系统分别建模, 再将子系统的模型联立化简得到混合系统的小信号模型 SSM。交流系统建立了同步发电机、励磁系统和交流网络的小信号模型, 直流系统建立了直流线路、换流器、触发角控制器和锁相环的小信号模型。最后介绍了在小信号稳定性分析中广泛应用的特征值分析法。结论如下:

(1) 选用节点注入功率分量与电压的幅值相角来描述交流网络的小信号模型, 相对于传统 xy 坐标系下的模型, 物理意义更加明确, 模型建立过程更加简单, 可以直接从潮流计算中取得系数矩阵 J 。

(2) 换流器作为交直流系统的接口, 选用注入功率与电压相量作为交直流系统的连接变量, 这种建模方式不仅物理意义更加清晰, 并且便于直流系统与交流系统模型的联立, 增强了模型的通用性。

(3) 特征值分析法不仅可以计算系统的稳定性、振荡频率与阻尼比等信息, 通过参与因子和参数灵敏度还可以分析状态变量和系统参数对稳定性的影响, 找到引起系统失稳的主要原因, 为改善系统稳定性提供指导。

第 3 章 考虑电压动态过程的小信号模型

3.1 引言

第 2 章中 LCC-HVDC 子系统的换流器小信号模型，其建立前提是认为系统在遭受小干扰后，换流器中各量之间的关系和受干扰前一致。这种假设可以有效降低换流器建模的复杂程度，但会在一定程度上降低模型精度。尤其是根据换流器工作原理，在遭受小干扰后，作用在换流器的网侧电压可能会发生变化，从而影响换相过程中各角度之间的关系，使模型出现误差。针对上述问题，研究电压动态过程对 LCC-HVDC 子系统小信号模型的影响，建立考虑电压动态过程的小信号模型，并对模型的正确性进行相应的仿真验证。

3.2 考虑电压动态过程的小信号模型

3.2.1 电压动态过程对 LCC-HVDC 小信号模型的影响

在 LCC-HVDC 子系统中，逆变侧换流器有如下换相角公式^[40]：

$$\beta_i = \arccos \left(\cos \gamma - \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}} \right) \quad (3-1)$$

稳态运行时，逆变侧触发角 α_i 和触发超前角 β_i 满足：

$$\alpha_i + \beta_i = \pi \quad (3-2)$$

将式(3-1)与(3-2)联立化简即可得到逆变侧换流器准稳态模型(2-19)中的第二式，这说明，式(2-19)中第二式成立的前提是满足 α_i 和 β_i 之和为 π 。

在 PSCAD 中建立如图 2-2 所示的直流系统电磁暂态模型，并在 10s 时刻给予系统一个小扰动（直流电流参考值 I_{dref} 从 1.0 p.u. 阶跃为 0.95 p.u.），逆变站中 α_i 和 β_i 之和的响应曲线如图 3-1 所示。由图可知，系统处于稳定运行状态时， α_i 和 β_i 之和为 π ；但系统遭受小扰动后， $\alpha_i + \beta_i = \pi$ 不再严格成立，这将使得逆变侧换流器模型中的第二式不严格成立。

分析其原因，是换流器网侧电压在遭受小干扰后的动态过程使得换流器中角度关系发生改变导致的。如图 3-2 所示，设网侧电压 $E_1 = E \sin(\omega t + \varphi_1)$ ， $E_2 = E \sin(\omega t + \varphi_2)$ ， φ_1 和 φ_2 为电压初相角。假设系统稳定运行时网侧电压运行在 E_1 ，电压不发生变化，此时 A、B 两点之间表示半个周期，其相角为 π ，即线电压两

自然换相点之间的角度为 π ，根据换流器工作原理可知此时 $\alpha_i+\beta_i=\pi$ ，换流器模型(2-19)成立。

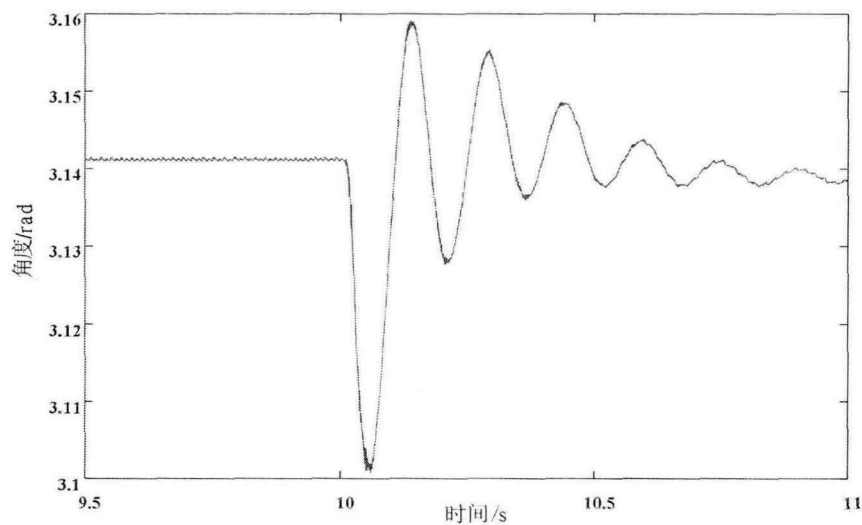


图 3-1 小干扰前后 α_i 和 β_i 之和的响应曲线

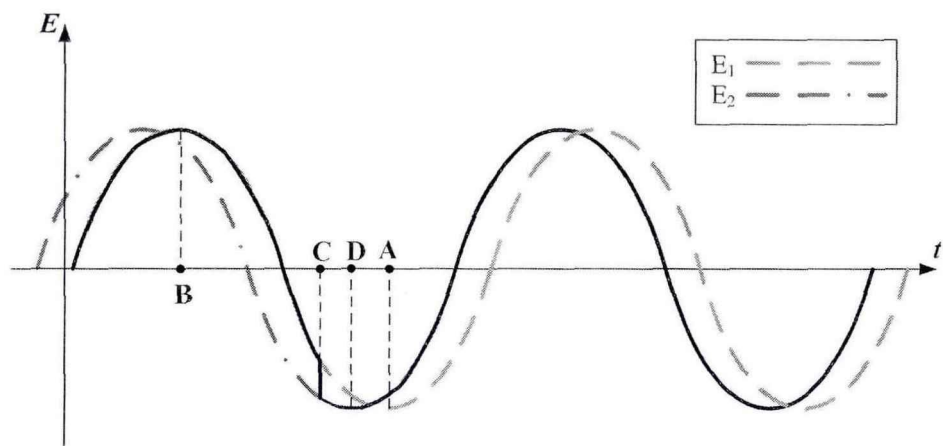


图 3-2 电压动态过程示意图

假设在 C 时刻系统受到小干扰，网侧电压发生变化，从 E_1 变化到 E_2 ，此时网侧电压如图中黑色实线所示。可以看到，B、D 两点之间表示电压的半个周期，说明在遭受小干扰后，线电压两自然换相点之间的角度不再等于 π ，从而在换流器中 $\alpha_i+\beta_i\neq\pi$ ，使得换流器模型(2-19)中的第二式不再严格成立，SSM 模型出现了误差。

3.2.2 模型改进

为考虑电压动态过程对逆变换流器小信号模型带来的影响，对 SSM 模型进行如下改进：

定义同一线电压两自然换相点之间角度与 π 的差 θ_π ：

$$\theta_{\pi} = \theta_{ac} - \theta_{ac} e^{-sT/2} \quad (3-3)$$

其中, θ_{ac} 为换流器网侧母线电压相角; $\theta_{ac} e^{-sT/2}$ 表示半个周期前该母线电压相角, T 是电压周期, 对于 50Hz 系统, $T=0.02s$ 。

逆变侧换流器中的角度关系满足:

$$\alpha_i + \beta_i + \theta_{\pi} = \pi \quad (3-4)$$

由上述定义可知, 式(3-4)在系统稳定运行和遭受小干扰时均成立。系统稳态运行时, 换流器网侧电压相角不发生变化, 即 $\theta_{\pi}=0$, 因此在稳态运行时式(3-4)退化为式(3-2)。

将式(3-4)带入式(3-1)后可得考虑电压动态过程影响的关断角 γ 满足:

$$\cos \gamma = \cos \beta_i + \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}} = \cos (\pi - \theta_{\pi} - \alpha_i) + \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}} \quad (3-5)$$

对式(3-3)中的延迟环节作帕德近似可得^[45]:

$$\theta_{\pi} = \theta_{ac} - \theta_{ac} \frac{1-sT/4}{1+sT/4} = \frac{sT/2}{1+sT/4} \theta_{ac} \quad (3-6)$$

令 $\theta_{\pi 2} = \theta_{ac} - \theta_{\pi}/2$, 带入上式整理得:

$$\theta_{\pi 2} = \frac{1}{1+sT/4} \theta_{ac} \quad (3-7)$$

对式(3-7)做拉普拉斯反变换可得状态方程:

$$T_{\pi} \dot{\theta}_{\pi 2} = \theta_{ac} - \theta_{\pi 2} \quad (3-8)$$

其中, $T_{\pi} = T/4 = 0.005s$ 。

综上, 考虑电压动态过程对小信号模型带来的影响后, 逆变侧换流器准稳态模型由式(2-19)改进为式(3-9):

$$\begin{cases} T_{\pi} \dot{\theta}_{\pi 2} = \theta_{ac} - \theta_{\pi 2} \\ \alpha_i + \beta_i + \theta_{\pi} = \pi \\ \theta_{\pi 2} = \theta_{ac} - \frac{\theta_{\pi}}{2} \\ V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n k_i E_{aci} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} n X_{ci} I_{di} \\ \cos \gamma = \cos (\pi - \theta_{\pi} - \alpha_i) + \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}} \\ P_{di} = V_{di} I_{di} \\ Q_{di} = -I_{di} \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} n k_i E_{aci} \right)^2 - V_{di}^2} \\ \alpha_i = \alpha'_i + \theta_{aci} - \theta_{p11i} \end{cases} \quad (3-9)$$

将式(3-9)线性化可得逆变侧换流器小信号模型式(3-10)。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \dot{\theta}_{\pi 2} = \frac{1}{T_{\pi}} \Delta \theta_{aci} - \frac{1}{T_{\pi}} \Delta \theta_{\pi 2} \\ \Delta \theta_{\pi} = -\Delta \alpha_i - \Delta \beta_i \\ \Delta \theta_{\pi 2} = \Delta \theta_{aci} - \frac{1}{2} \Delta \theta_{\pi} \\ \Delta V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_i \cos \gamma \Delta E_{aci} - \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nk_i E_{aci} \sin \gamma \Delta \gamma - \frac{3}{\pi} n X_{ci} \Delta I_{di} \\ - \sin \gamma \Delta \gamma = \sin(\theta_{\pi} + \alpha_i)(\Delta \theta_{\pi} + \Delta \alpha_i) + \frac{\sqrt{2} X_{ci} \Delta I_{di}}{k_i E_{aci}} - \frac{\sqrt{2} X_{ci} I_{di}}{k_i E_{aci}^2} \Delta E_{aci} \\ \Delta P_{di} = \Delta V_{di} I_{di} + V_{di} \Delta I_{di} \\ \Delta Q_{di} = -N_{di} \Delta I_{di} - \frac{(nk_i)^2}{N_{di}} I_{di} E_{aci} \Delta E_{aci} + \frac{I_{di} V_{di}}{N_{di}} \Delta V_{di} \\ \Delta \alpha_i = \Delta \alpha'_i + \Delta \theta_{aci} - \Delta \theta_{pLLi} \end{array} \right. \quad (3-10)$$

式中： $N_{di} = \sqrt{\left(3\sqrt{2} / \pi \cdot nk_i E_{aci}\right)^2 - V_{di}^2}$ 。

考虑电压动态过程的 LCC-HVDC 子系统小信号模型由式(2-16)、(2-18)、(2-22)、(2-24)、(2-26)和(3-10)组成。对比可知，考虑电压动态过程的小信号模型相较于原模型增加了一阶状态方程，并修正了角度关系与关断角 γ 的表达式，直流系统的状态变量变为 $\mathbf{x}_d = [I_{dr}, I_{dr}', \varphi, \varphi_{PLLr}, \theta_{PLLr}, I_{di}, \gamma', \mu, \varphi_{PLLl}, \theta_{PLLl}, \theta_{\pi 2}, V_c]^T$ 。将改进后的考虑电压动态过程的 LCC-HVDC 子系统小信号模型与交流子系统小信号模型式(2-27)联立即可得到考虑电压动态过程的小信号模型(small signal model considering voltage variation, SSM-CVV)。

3.3 模型验证

3.3.1 小信号模型验证

为验证所建立的考虑电压动态过程的小信号模型的正确性及对模型精确度的提升，本节以 LCC-HVDC 系统为例，在 PSCAD 中建立如图 2-2 所示的直流系统电磁暂态模型，系统主要参数如表 3-1 所示。

令系统在额定状态下运行至 10s 时，定电流控制器的参考值 I_{dref} 从 1.0（标么值）阶跃为 0.95（标么值），将电磁暂态仿真结果与第 2 章中的小信号模型（SSM）和本章建立的考虑电压动态过程的小信号模型（SSM-CVV）的计算结果进行对比，系统的动态响应如图 3-3 所示。

表 3-1 LCC-HVDC 系统参数

系统参数		数值
系统容量		1000MW, 50Hz
交流系统电源/p.u.		$E_r=1.1\angle 0^\circ, E_i=0.93\angle 0^\circ$
交流系统短路比		$SCR_1=2.5\angle 85^\circ, SCR_2=2.5\angle 75^\circ$
换流变漏抗/ Ω		$X_{cr}=13.585, X_{ci}=13.315$
换流变压器变比		$k_r=345/213.4557, k_i=230/209.2288$
直流线路电阻/ Ω		$R=2.5$
直流线路电感/H		$L=0.5968$
直流线路电容/ μF		$C=26$
定电流控制	比例增益	$K_r=0.5$
	积分时间常数/s	$T_i=0.02$
定关断角控制	比例增益	$K_i=0.3753$
	积分时间常数/s	$T_i=0.0272$
锁相环	比例增益	$K_{pr}=K_{pi}=10$
	积分增益	$K_{PLLr}=K_{PLLi}=50$

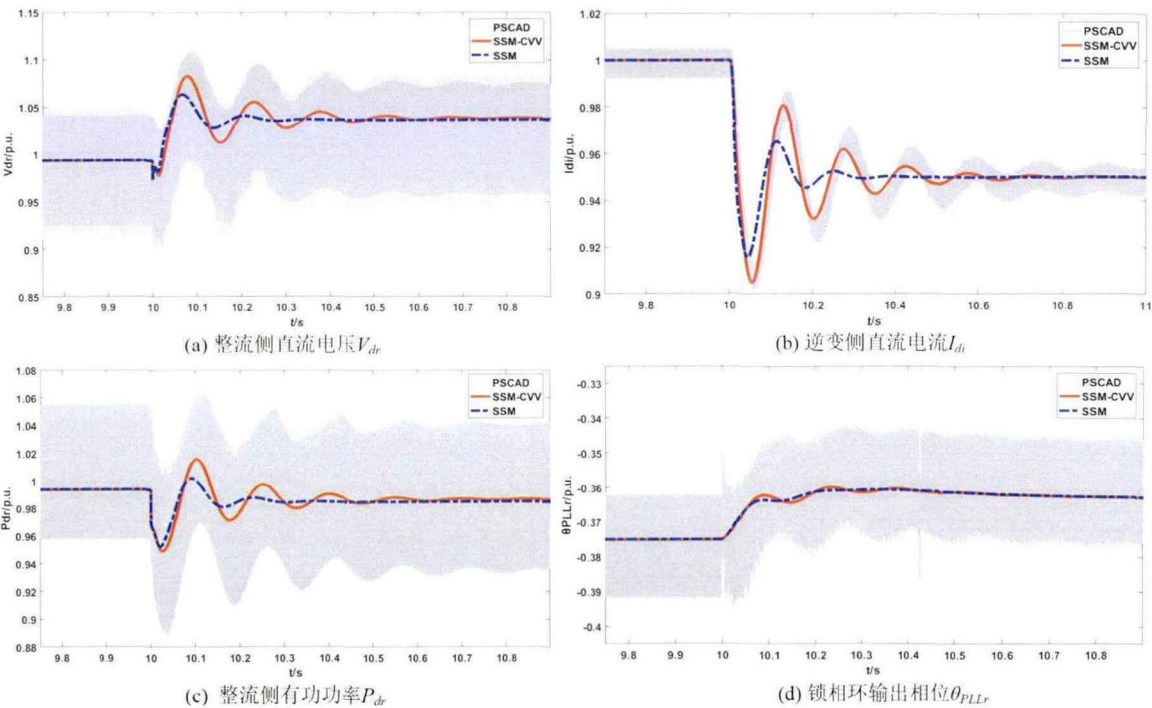


图 3-3 I_{dref} 阶跃时系统的动态响应

由图 3-3 可知，在遭受到小扰动后，系统中各量出现衰减振荡模态，大约 0.8s 后振荡衰减完毕，系统恢复稳定。将电磁暂态仿真结果与 SSM-CVV 和 SSM 的计算结果对比可知，本章建立的 SSM-CVV 模型比 SSM 模型更接近 PSCAD 电磁暂态模型，对系统遭受小干扰后的暂态过程描述更加准确。与电磁暂态模型相比，基于 SSM 模型的仿真曲线的振荡频率略高、衰减速度明显更快。因此 SSM

模型容易得到偏“乐观”的小信号稳定性分析结果，这一点在后面的控制参数边界的分析中也将得到印证。

为了进一步验证本章建立的 SSM-CVV 模型的准确性，将 PSCAD 仿真曲线的 Prony 分析结果与 SSM 模型、SSM-CVV 模型的模态分析结果进行对比。Prony 分析方法通过对数据进行降阶处理，将信号看作是任意幅值、相位、频率和衰减因子的指数函数之和来拟合系统的数据，能直接准确地提取非线性、高阶系统的振荡频率和幅值等振荡特征。电磁暂态仿真曲线的 Prony 分析结果如表 3-2 所示，两种小信号模型计算出的系统特征值与振荡频率如表 3-3 所示。由于 Prony 分析结果受拟合阶数大小影响，表 3-2 中仅列出了幅值较大，对系统影响明显的信号数据。

表 3-2 电磁暂态仿真曲线的 Prony 分析部分结果

模式	幅值	频率 (Hz)
1 直流	1.9	--
2 正弦	0.048	6.6
3 直流	0.033	--
4 正弦	0.016	37

表 3-3 两种小信号模型计算的系统特征值与振荡频率

模型	特征值	频率(Hz)
SSM	-1643.59+j0	--
	-665.41+j0	--
	-103.78±j264.02	42.02
	-188.76+j0	--
	-13.80±j44.89	7.14
	-4.75±j4.70	0.75
	-5.11±j5.10	0.81
SSM-CVV	-2362.61+j0	--
	-692.91+j0	--
	-430.50+j0	--
	-146.18±j238.01	37.89
	-77.34+j0	--
	-6.48±j 42.12	6.70
	-4.75±j 4.69	0.75
	-5.11±j5.10	0.81

由表 3-2 可知系统暂态过程中的主导振荡频率为 6.6Hz。而在表 3-3 中,SSM 模型计算出的振荡频率 7.14Hz 比实际振荡频率 6.6Hz 大,相对误差为 8.1%。本章建立的 SSM-CVV 模型相比于 SSM 模型维数仅增加一阶,但得到的 6.7Hz 振荡频率计算结果与实际振荡频率更为接近,相对误差仅为 1.5%,模型精度更高。

3.3.2 模型的选择对小信号稳定性分析结果的影响

准确的小信号模型是进行系统小信号稳定性分析的基础,本节采用根轨迹和主导模态分析方法,研究分别选择 SSM 与 SSM-CVV 两种模型对系统进行小信号稳定性分析时,模型对分析结果的影响。

在相同的初始状态下,保持其他参数不变,逐渐减小逆变 PI 控制器积分时间常数 T_i 的取值,SSM 和 SSM-CVV 两种模型的主导模态的根轨迹如图 3-4 所示。图中,横轴表示特征值的实部,纵轴表示特征值的虚部,随着积分时间常数 T_i 的减小,特征值的变化轨迹如图中箭头方向所示。

由图 3-4 可知,随着 PI 控制器时间常数 T_i 的逐渐减小,两种模型计算的主导模态特征值都在虚轴左侧逐渐向靠近虚轴方向移动,最后特征值穿越虚轴,即系统的小信号稳定性随着 T_i 减小而逐渐降低直至失稳。但两种模型在计算系统稳定运行的参数边界值上存在较大偏差:对于 SSM-CVV 模型,当 T_i 继续减小且小于 0.0161 时,系统的主导模态穿越虚轴,开始出实现部为正的 特征值,系统开始由稳定状态转为发散;而根据 SSM 模型的计算结果, T_i 直到减少至小于 0.0096 时特征值才会穿越虚轴,系统才开始发散。根据 SSM 计算的结果,在时间常数 T_i 减小的过程中,系统的可稳定运行范围更广,即使用 SSM 模型进行系统小信号稳定性分析的结果会更“乐观”。

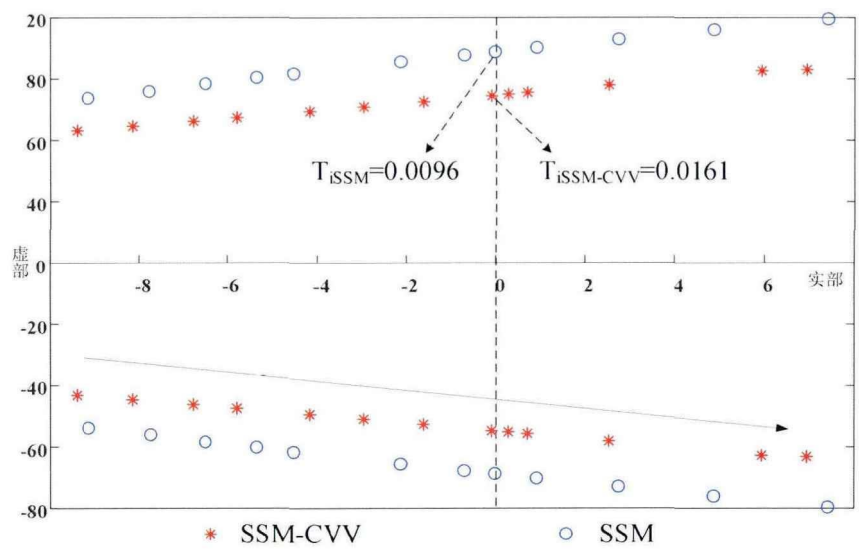


图 3-4 T_i 变化时两种模型的主导模态根轨迹

为研究上述两种模型计算的不同参数临界值的正确性，在 PSCAD 中进行如下仿真验证：系统运行于初始稳定状态，保持其他参数不变，在 $t=5\text{s}$ 时刻设置 T_i 从 0.03 阶跃到 0.015，逆变侧直流电流 I_{di} 的电磁暂态仿真结果如图 3-5 所示。

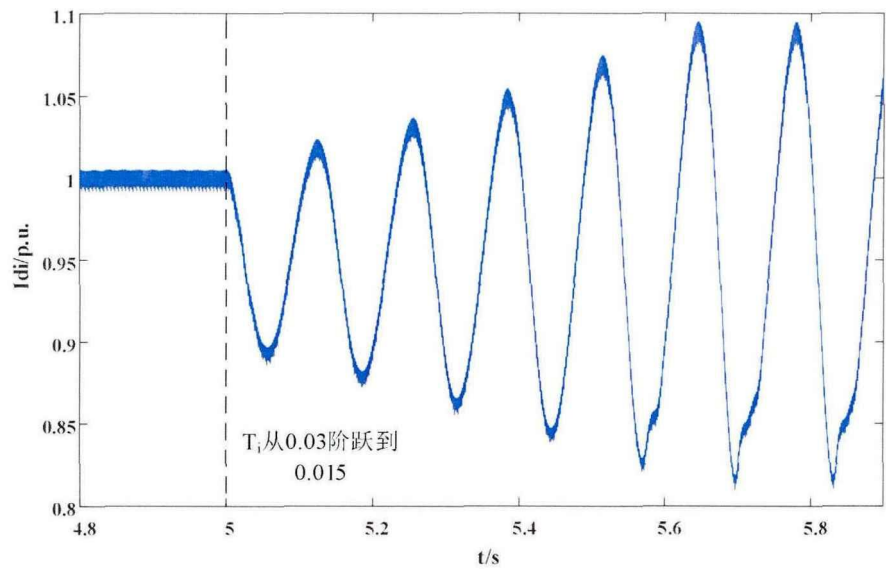


图 3-5 T_i 变化时直流电流 I_{di} 响应曲线

由图 3-5 可知，在其他参数不变的条件下，当 T_i 从 0.03 阶跃到 0.015 后，系统由稳定状态变为振荡发散。根据 SSM-CVV 模型的计算结果， $T_i=0.015$ 时系统的主导特征值位于虚轴右侧，系统会出现发散失稳，与仿真结果一致；而根据 SSM 模型的计算结果， $T_i=0.015$ 时系统的主导特征值位于虚轴左侧，系统仍应处于稳定状态，与仿真结果不符。

系统的稳定边界是系统稳定性中最关键最重要的研究内容。上述分析说明，若使用不考虑电压动态过程影响的 SSM 模型对系统进行小信号稳定性分析，可能会在系统稳定边界附近得到错误结论，在计算系统稳定运行的临界参数时出现较大偏差。而使用考虑电压动态过程的 SSM-CVV 模型，则可以得到准确的系统临界参数，对系统稳定边界附近的状态判断也更为准确。因此，在研究系统小信号稳定性问题时，应考虑电压的动态过程，采用本章提出的 SSM-CVV 模型。

3.4 本章小结

本章基于上一章所建立的小信号模型，研究了电压动态过程对小信号模型 SSM 的影响，并对 SSM 模型进行了改进，建立了考虑电压动态过程的小信号模型 SSM-CVV。为了验证所提模型的正确性和模型精度，将电磁暂态仿真结果与两种模型计算结果进行了对比，并研究了使用上述两种模型对系统小信号稳定性分析结果的影响。结论如下：

(1) 在系统遭受小干扰后, 换流器网侧电压的动态过程将使其内部的角度关系不再严格成立, 使得小信号模型 SSM 出现误差。

(2) 所建立的考虑电压动态过程的小信号模型 SSM-CVV, 定义了新的变量 θ_π 与 $\theta_{\pi 2}$, 加入了新的状态方程, 修正了逆变侧换流器内部的角度关系与关断角 γ 的表达式, 使得 SSM-CVV 模型相较于 SSM 模型阶数虽然增加一阶, 但能够精确描述系统遭受小干扰后的暂态过程, 且对系统振荡频率等信息计算更为准确, 显著提高了小信号模型的精度。

(3) 在对系统进行小信号稳定性分析时, 不考虑电压动态过程的 SSM 模型往往会得出偏“乐观”的分析结果, 在系统稳定边界附近可能会得到错误结论, 无法准确反映系统的稳定性; 而本章提出的考虑电压动态过程的 SSM-CVV 模型, 可以准确计算出系统的临界参数, 在稳定边界附近也可以得到准确的分析结果, 适合用来进行系统小信号稳定性分析。

第 4 章 交直流混合系统小信号稳定性分析

4.1 引言

高压直流输电技术是解决远距离、大容量输电问题的有效手段,随着电网中 LCC-HVDC 工程的增多,直流控制系统中的控制参数会在不同程度上影响系统的运行稳定性,发电机与直流系统间的相互作用也会对系统的稳定裕度造成影响,因此提高含 LCC-HVDC 的交直流混合系统的运行稳定性成为了一项重要课题。针对上述问题,采用第 3 章提出的 SSM-CVV 模型对 LCC-HVDC 系统和交直流混合系统进行小信号稳定性分析,研究影响系统稳定性的因素,计算系统控制参数稳定域,以提高系统运行稳定性,为改善系统稳定裕度提供指导。

4.2 LCC-HVDC 系统小信号稳定性分析

4.2.1 控制参数对系统小信号稳定性的影响

采用根轨迹分析法研究直流控制系统参数对系统小信号稳定性的影响。保持其他参数不变,计算某一控制系统参数在不同取值下的系统特征根,以特征根的实部为横轴,虚部为纵轴绘制系统的特征根轨迹图。当系统特征根位于虚轴(实部为 0)左侧时,系统稳定,且离虚轴越远代表系统稳定裕度越大;而当系统特征根位于虚轴右侧时,系统将失稳。

(1) 整流 PI 控制器积分时间常数 T_i

保持其他参数不变,逐渐将整流 PI 控制器积分时间常数 T_i 从 0.01s 减小到 0.001s,系统的特征根轨迹如图 4-1 所示,图中仅给出了可能影响系统稳定性的虚轴附近的特征根轨迹,离虚轴较远的负实部特征根未标出。

由图可知,在时间常数 T_i 逐渐减小的过程中,共有三对特征根在虚轴附近,其中两对特征根在 T_i 减小过程中变化较小且始终位于虚轴左侧,不会对系统稳定性造成影响;而主导特征根会随着 T_i 的逐渐减小,在虚轴左侧逐渐向靠近虚轴方向移动,此时系统的稳定裕度将逐渐减小但仍处于稳定状态;当 T_i 减小到 0.0018s 时,这对特征根会穿越虚轴来到右侧,导致系统失稳。

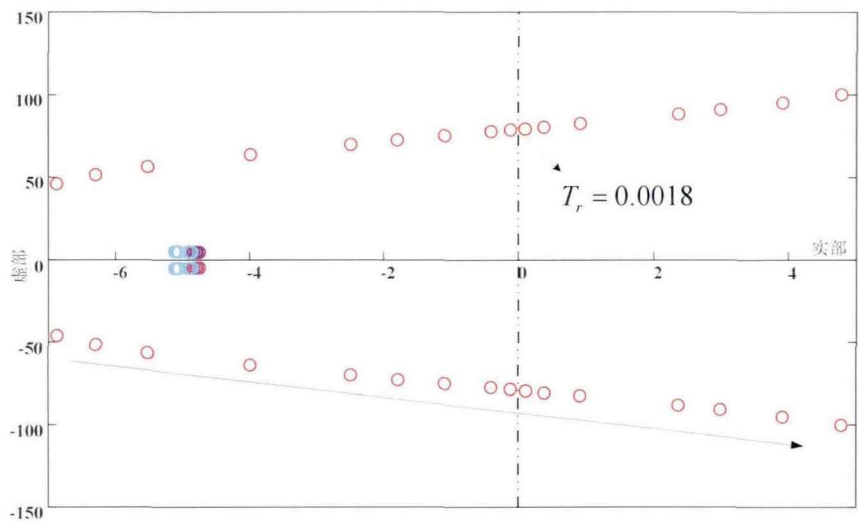


图 4-1 T_r 从 0.01 减小到 0.001 的系统根轨迹

为验证上述根轨迹的正确性，在 PSCAD 中进行如下仿真验证：系统运行于相同的初始稳定状态，保持其他参数不变，在 $t=5s$ 时刻分别设置 T_r 从 0.01 阶跃到 0.0017、 T_r 从 0.01 阶跃到 0.002，整流侧直流电流 I_{dr} 的电磁暂态仿真结果如图 4-2 所示。当 T_r 从 0.01 阶跃到 0.0017 时，在根轨迹图中系统特征根始终位于虚轴左侧，说明系统仍能保持稳定，与电流响应曲线一致；当 T_r 从 0.01 阶跃到 0.002 时，在根轨迹图中系统特征根从左侧穿越虚轴来到右侧，说明 T_r 阶跃后系统将失稳，而在电流响应中系统在 5s 后也产生了振荡失稳，分析与仿真结果一致，验证了根轨迹的正确性，同时也说明系统的小信号稳定性会随着 T_r 减小而逐渐降低，而过低的 T_r 取值不仅会降低系统的稳定裕度，甚至会导致系统失稳。

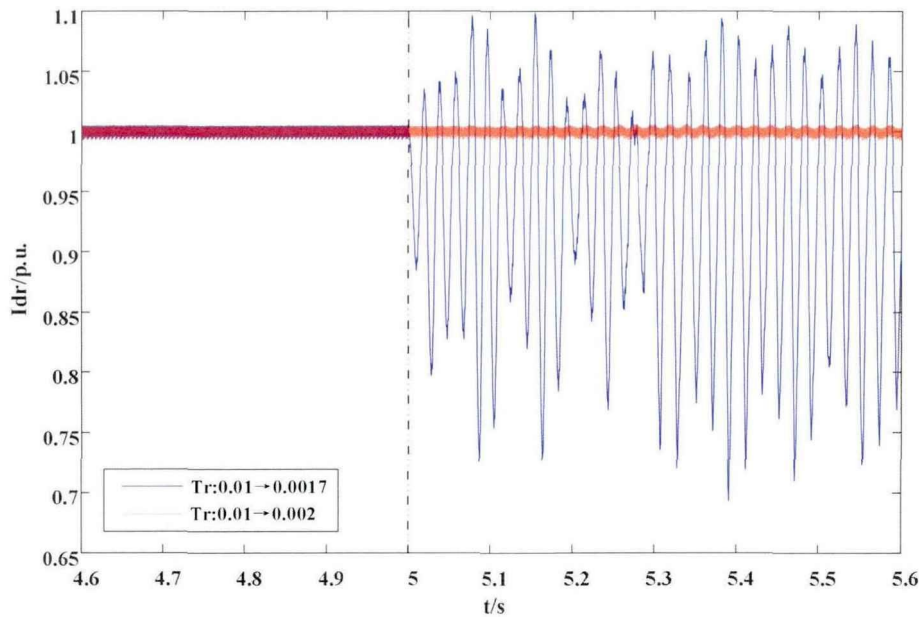


图 4-2 T_r 变化时直流电流 I_{dr} 响应曲线

(2) 逆变 PI 控制器比例增益 K_i

保持其他参数不变，逐渐将逆变 PI 控制器比例增益 K_i 从 0.02 增大到 0.95，系统的特征根轨迹如图 4-3 所示，图中给出了可能影响系统稳定性的虚轴附近的特征根轨迹。

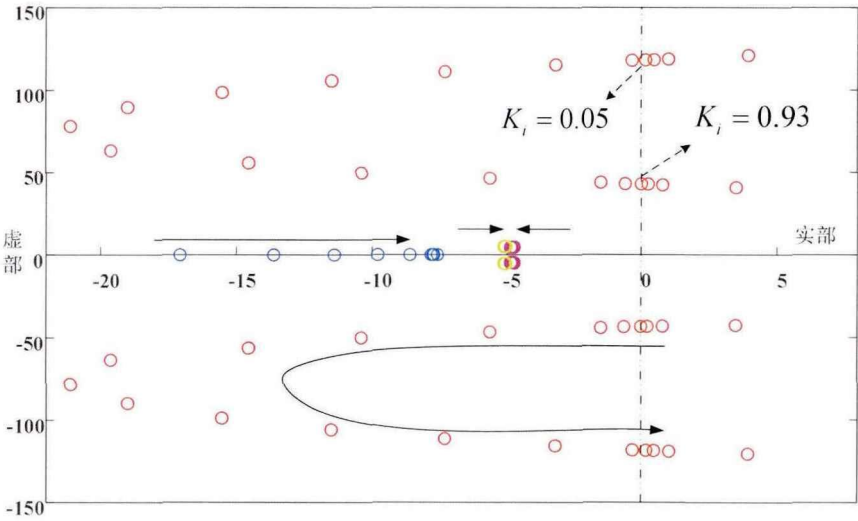


图 4-3 K_i 从 0.02 增大到 0.95 时的系统根轨迹

由图可知，在比例增益 K_i 增大的过程中，有一对主导特征根轨迹呈“U 型”。这对特征根会先后两次穿越虚轴对系统的稳定性造成影响：在 K_i 取值较小时，主导特征根位于虚轴的右半平面，此时系统在受到小扰动后将失稳；随着 K_i 取值逐渐增大，该主导特征根将向虚轴左侧移动，在 $K_i=0.05$ 时穿越虚轴来到左半平面，并且在一定范围内随着 K_i 的增大远离虚轴，此时系统的稳定裕度逐渐增大；当 K_i 增大到一定程度时，主导特征根会随着 K_i 的增大再次向虚轴靠近，系统稳定性逐渐降低，并在 $K_i=0.93$ 时失稳。

为验证上述根轨迹的正确性，在 PSCAD 中进行如下仿真验证：保持其他参数不变，分别令系统中比例增益 K_i 取值为 0.93、0.3753 和 0.05，在 $t=10s$ 时刻给系统一相同的小扰动（定电流控制器的参考值 I_{dref} 从 1.0p.u. 阶跃为 0.95p.u.），逆变侧直流电流 I_{di} 的电磁暂态仿真结果如图 4-4 所示。由根轨迹图可知，当 K_i 取值为 0.3753 时特征根位于虚轴左侧，系统应稳定； K_i 取值为 0.93 和 0.05 时特征根位于虚轴右侧，系统遭受小扰动后将失稳。由图 4-4 中直流电流的响应可知，当 $K_i=0.3753$ 时，系统在受到小扰动后在经过短暂的振荡衰减恢复稳定；而当 K_i 取 0.93 和 0.05 时，系统在受到小扰动后都会出现振荡失稳现象，分析与仿真结果一致，证明了根轨迹的正确性。同时由上述分析可知，比例增益 K_i 存在一个使系统稳定运行的取值区间，在本节的模型中为 $[0.05, 0.93]$ 。在一定范围内增加的 K_i 取值，系统的稳定性将得到提高，而进一步增加 K_i 将导致系统稳定裕度降

低，甚至系统失稳，因此合理的 K_i 取值选择将有利于系统的稳定运行。

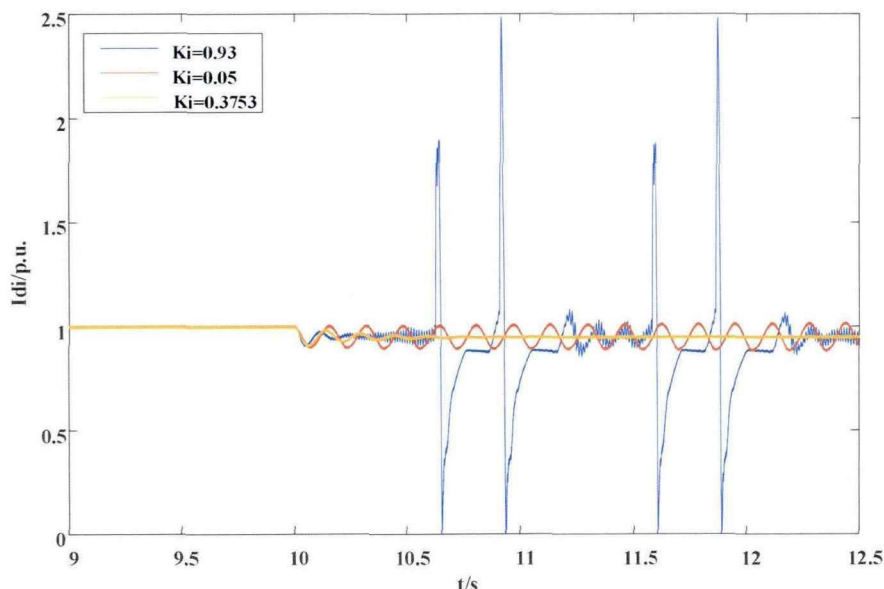


图 4-4 不同 K_i 取值下直流电流 I_d 的响应

4.2.2 系统控制参数稳定域

为了保证系统的稳定运行，除了要明确系统各控制参数对系统稳定性的影响外，还需要给出系统控制参数的调整范围即系统控制参数稳定域，以提高系统稳定裕度或在失稳后使系统恢复稳定。

控制参数稳定域的具体计算过程为：选取两个控制器参数为一组，保持其他参数不变，逐渐更改这两个参数数值，计算每一组参数取值组合下的特征值和对应的阻尼比，得到最小阻尼比与参数取值组合的对应关系，获得参数稳定域。由于最小阻尼比对应的特征值是距离虚轴最近的特征值，它决定着系统的稳定与否，因此可以用最小阻尼比判断系统稳定性及裕度。最小阻尼比大于 0，系统稳定，且阻尼比数值越大，系统的小信号稳定性越强；最小阻尼比小于 0，系统将失稳发散。

本节使用 SSM-CVV 模型，以逆变侧为例，计算 PI 控制器比例增益 K_i 与积分时间常数 T_i 的稳定域、锁相环参数 K_{PLL} 与 PI 控制器积分时间常数 T_i 的稳定域分别为图 4-5 和图 4-6 所示。由图可知黄色区域的参数组合相较于蓝色区域对应的最小阻尼比更高，系统稳定裕度更高。图中红色线表示系统的稳定边界，即在该参数组合下系统的最小阻尼比为 0。根据参数稳定域可知，为保证系统稳定，运行过程中的参数调整不应超过图中红色边界，且参数取值在图中越靠近黄色区域，系统的稳定性越强。

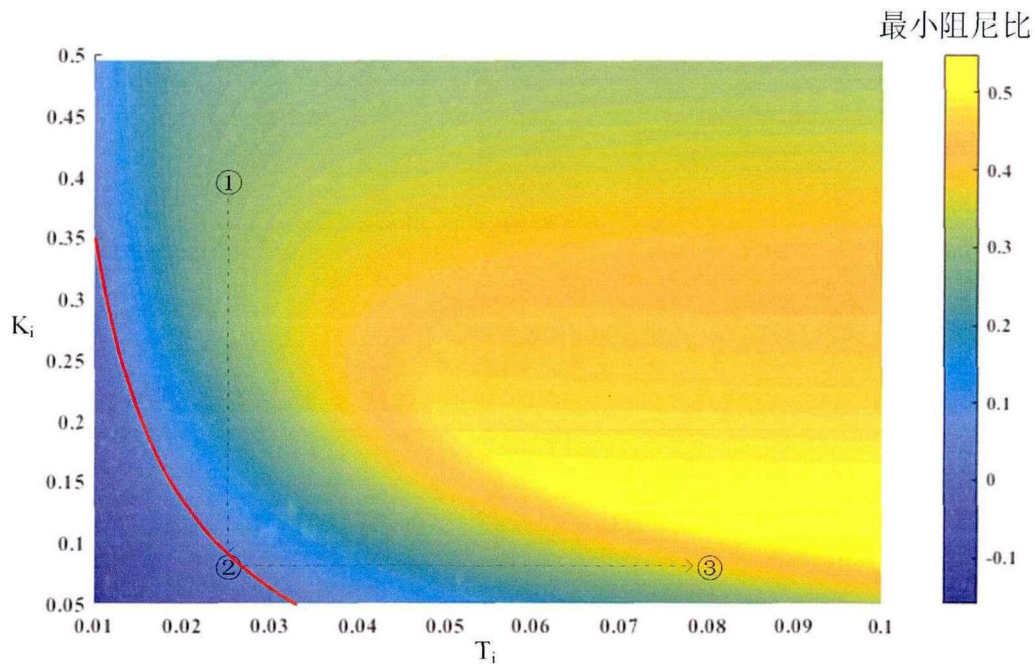


图 4-5 K_i 与 T_i 的稳定域

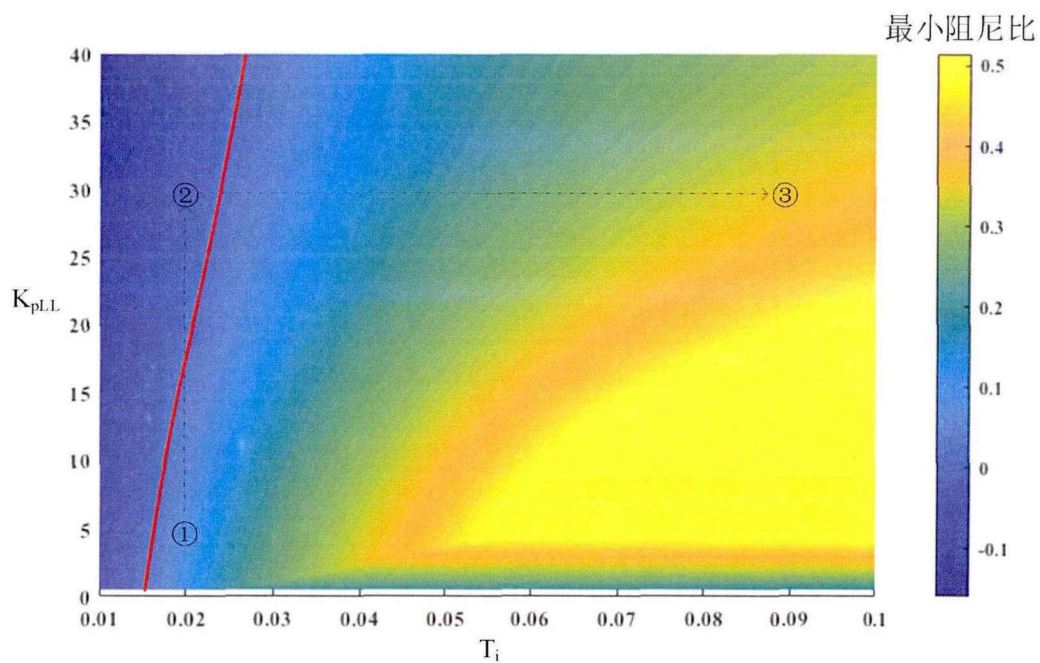


图 4-6 K_{PLL} 与 T_i 的稳定域

为验证上述参数稳定域的正确性，在 PSCAD 中进行相应的电磁暂态仿真：系统以稳定域中的 1 号点为初始状态，保持其他参数不变，在 5s 时刻将控制参数切换到代表系统失稳的 2 号点，在 6s 时刻再将控制参数切换到 3 号点。对于图 4-5，系统初始状态为 $K_i=0.4$ 、 $T_i=0.025$ ，保持其他参数不变，在 5s 时刻将 K_i 取值切换到 0.07，再在 6s 时刻将 T_i 取值切换到 0.08，直流电流的响应曲线如图 4-7 所示。对于图 4-6，系统初始状态为 $K_{PLL}=5$ 、 $T_i=0.02$ ，保持其他参数不变，

在 5s 时刻将 K_{PLL} 取值切换到 30，再在 6s 时刻将 T_i 取值切换到 0.09，直流电流的响应曲线如图 4-8 所示。

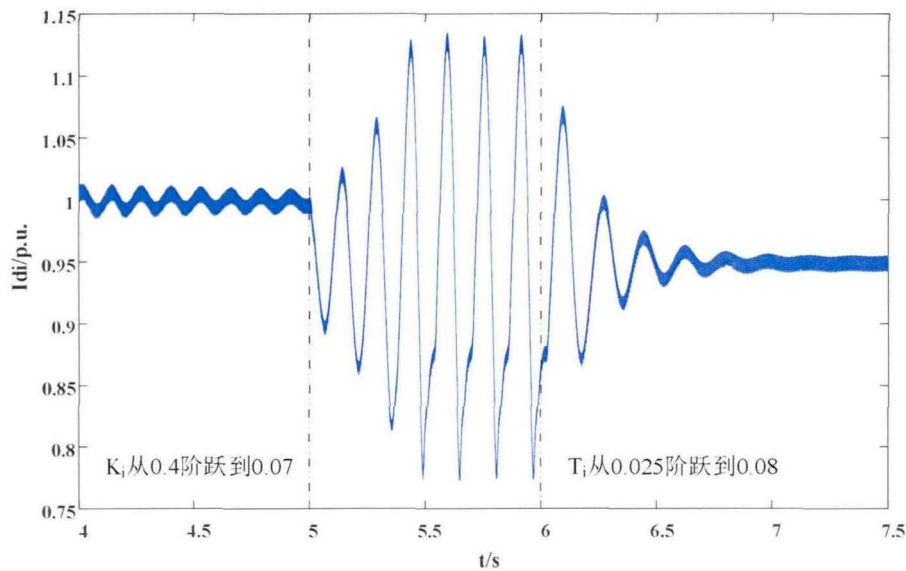


图 4-7 K_i 与 T_i 稳定域对应的响应曲线

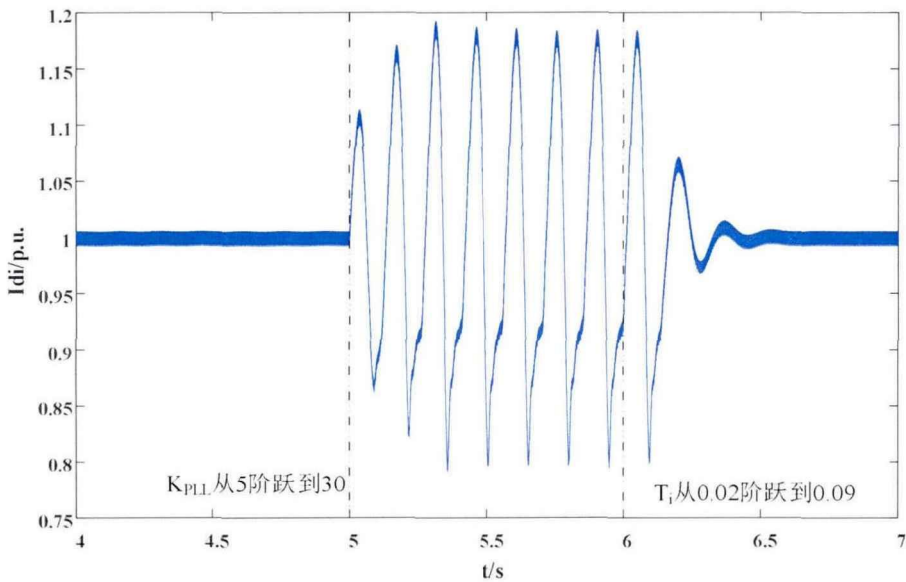


图 4-8 K_{PLL} 与 T_i 稳定域对应的响应曲线

通过计算的稳定域与相应的电流响应曲线对比可知，当控制参数由 1 号点切换到 2 号点时，最小阻尼比穿过稳定边界，由正变为负，系统会从稳定状态转为不稳定状态，对应响应曲线中 $t=5s$ 时电流变为振荡发散；当控制参数由 2 号点切换到 3 号点时，最小阻尼比增大变回正数，系统会恢复稳定状态，对应响应曲线中 $t=6s$ 时电流恢复稳定；并且 3 号点对应的最小阻尼比大于 1 号点，对应参数组合下的系统稳定性更好，系统恢复稳定速度更快，分析与仿真结果一致验证了模型计算的参数稳定域的正确性。另外，从参数稳定域中可以得知，如果只减

小 PI 控制器比例增益 K_i 或只增大锁相环参数 K_{PLL} ，会导致系统稳定性下降甚至失稳，此时可以通过增大控制器积分时间常数 T_i 提高系统稳定性。

由上述分析可知，使用 SSM-CVV 模型计算的参数稳定域揭示了 LCC-HVDC 系统控制参数与系统稳定性的关系，可以为系统控制参数的调整划定范围，为提高系统运行稳定性提供参考。

4.3 交直流混合系统小信号稳定性分析

交直流混合系统主要可分为三部分：送端电网、直流系统和受端电网。为了研究交直流混合系统的小信号稳定性，探究大系统中直流系统与其附近的同步发电机之间的相互作用，本节使用的模型在上节 LCC-HVDC 系统模型的基础上，在整流侧交流系统中加入同步发电机，模型结构如图 4-9 所示。模型中的直流系统参数与表 3-1 相同，发电机与励磁系统参数见表 4-1。

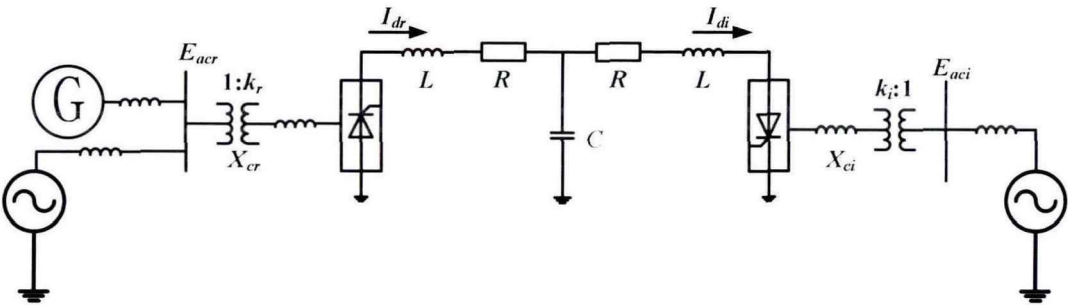


图 4-9 交直流混合系统结构

表 4-1 发电机与励磁系统参数

系统参数	数值
基准值	1000MVA, 345kV
发电机惯性时间常数/s	$T_J=3.5$
直轴电抗/p.u.	$X_d=1.81$
直轴暂态电抗/p.u.	$X_d'=0.3$
直轴暂态时间常数/s	$T_d'=6.55$
交轴电抗/p.u.	$X_q=1.76$
交轴暂态电抗/p.u.	$X_q'=0.5$
交轴暂态时间常数/s	$T_q'=0.85$
励磁增益/p.u.	$K_A=20$
励磁时间常数/s	$T_A=0.04$

4.3.1 系统模态分析

建立图 4-9 对应的交直流混合系统 SSM-CVV 模型，化简可得系统的状态空

间模型：

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \tag{4-1}$$

其中，状态变量 $x=[\delta, \omega_r, E_q', E_d', E_f, I_{dr}, I_{dr}', \varphi, \varphi_{PLLr}, \theta_{PLLr}, I_{di}, \gamma', \mu, \varphi_{PLLi}, \theta_{PLLi}, \theta_{\pi 2}, V_c]^T$ 。

在 PSCAD 中建立图 4-9 所示的交直流系统电磁暂态模型，在系统运行至 10s 时刻时，令 I_{dref} 从 1.0（标么值）阶跃为 0.95（标么值），直流电流 I_{dr} 、换流母线电压 E_{acr} 和发电机转速 w 的电磁暂态仿真结果分别如图 4-10、图 4-11 和图 4-12 所示。SSM-CVV 模型计算的模态分析结果见表 4-2。

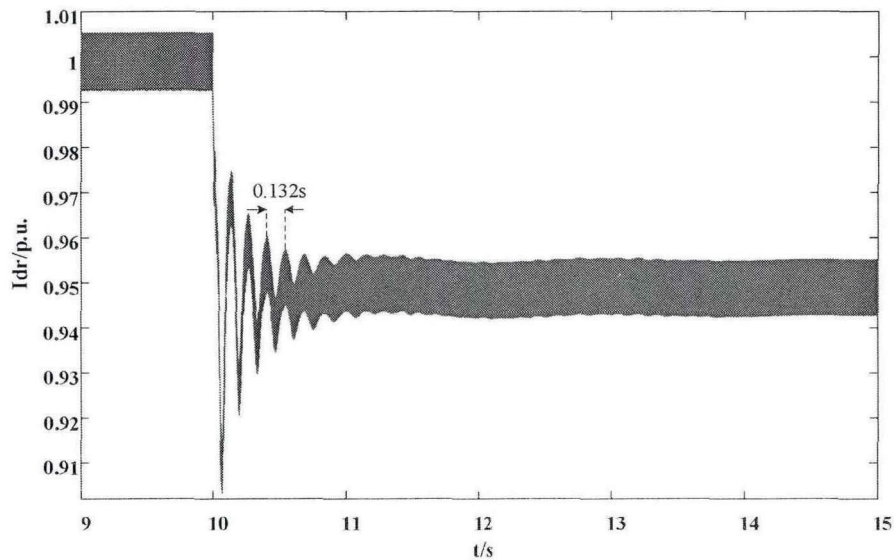


图 4-10 直流电流 I_{dr}

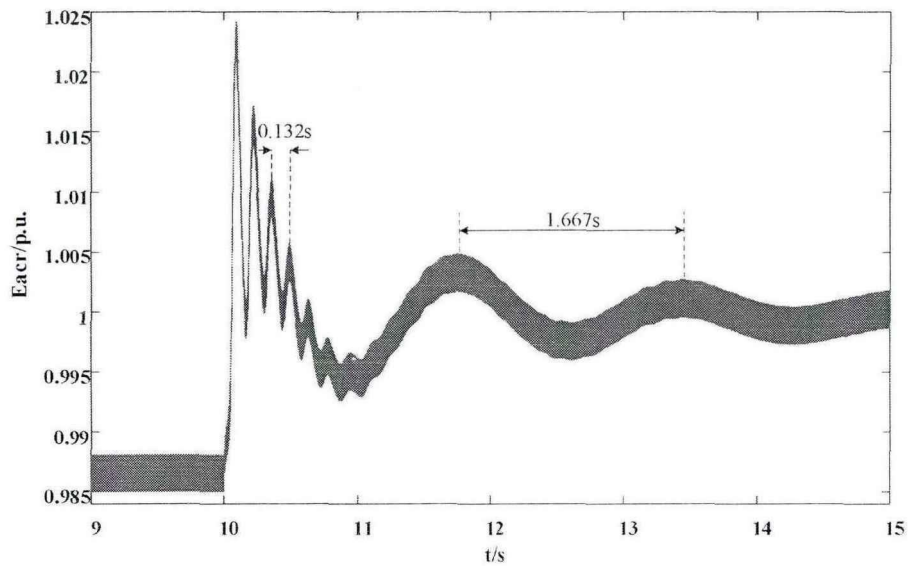


图 4-11 换流母线电压 E_{acr}

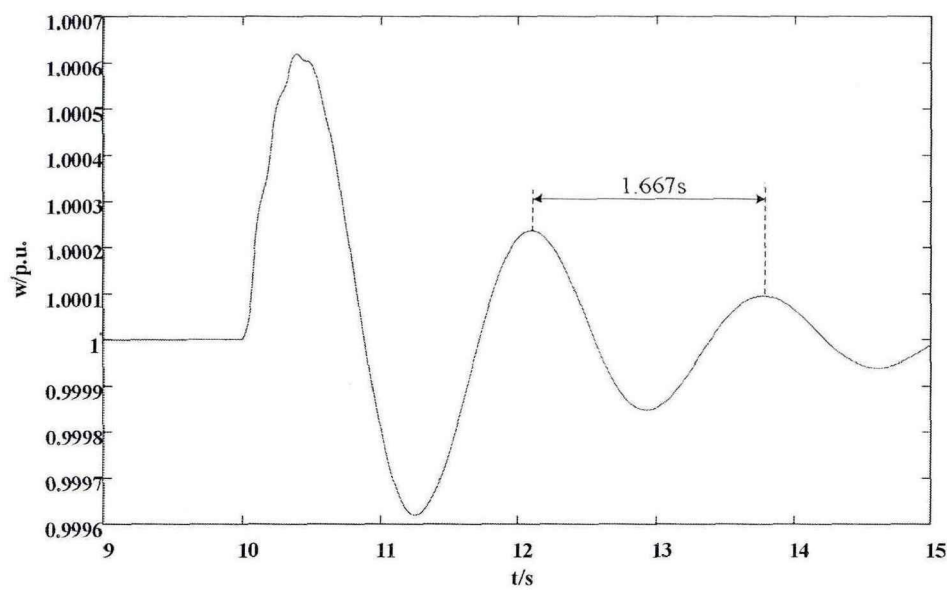


图 4-12 发电机转速 w

表 4-2 SSM-CVV 模型模态结果

模态	特征值	振荡频率(Hz)	阻尼比
1	-3319.89+j0	--	1
2	-646.16+j0	--	1
3	-371.25+j0	--	1
4,5	-143.58±j234.74	37.35	0.52
6,7	-22.9±j48.79	7.76	0.42
8	-51.08+j0	--	1
9	-21.76+j0	--	1
10,11	-0.26±j4.19	0.66	0.063
12	-1.06+j0	--	1
13	-3.08+j0	--	1
14,15	-5.11±j5.11	0.81	0.70
16,17	-4.82±j4.73	0.75	0.71

由 SSM-CVV 模型计算的模态结果可知，系统特征值实部均为负数，表明系统在遭受小干扰后可以恢复稳定，这点可以在 PSCAD 仿真结果图中得到印证；同时表中计算出的在系统中容易出现的两种振荡频率（7.76Hz 与 0.66Hz），与实际系统的振荡频率（7.6Hz 与 0.6Hz）误差较低，验证了模型的正确性。

通过仿真结果可知，在遭受小干扰后交直流系统中出现了两种振荡：直流系统以 7.6Hz 的频率振荡衰减，恢复稳定的速度较快；发电机以 0.6Hz 的低频振荡模式缓慢衰减。而在换流母线电压的响应曲线中，同时存在上述两种振荡，由于频率为 7.6Hz 的振荡模式对应的阻尼比为 0.42，大于低频振荡模式对应的阻尼比 0.063，因此其恢复稳定的速度更快，7.6Hz 振荡模式迅速衰减完毕后换流器母线电压继续以 0.6Hz 的低频振荡缓慢衰减。

上述现象说明，当交直流系统受到小干扰后，由于阻尼较弱，系统中会发生缓慢衰减的低频振荡现象，包含换流母线在内的交流系统中会产生较明显的低频振荡，然而低频振荡模式在直流系统的响应中却表现不明显。究其原因，是由于换流站中的直流控制系统可以通过改变换流器触发角来保证直流电流在整定值附近的小范围内，当换流母线电压出现低频振荡时，直流系统可以通过控制回路感受到这种变化，控制器会产生相应的触发角控制信号改变触发角，以维持直流侧电流的稳定。因此在直流系统中换流器能够被正常触发的前提下，直流系统基本不受低频振荡的影响，在一定程度上可以抑制低频振荡的传播。

4.3.2 参数对交直流混合系统小信号稳定性的影响

由于交直流混合系统控制参数较多，参数变化都会不同程度地影响特征值从而影响系统稳定性，因此要选取数值变化对系统稳定性影响较大的参数进行研究。为此，计算系统中振荡模式特征值对控制参数的灵敏度，结果如表 4-3 所示。

表 4-3 特征值对控制参数的灵敏度

参数	$\lambda_{4,5}$	$\lambda_{6,7}$	$\lambda_{10,11}$	$\lambda_{14,15}$	$\lambda_{16,17}$
K_A	-1.43+j1.85	2.73-j4.38	3.83-j4.68	-0.035+j0.008	0.68+j1.39
T_j	-1.49- j2.94	-15.6+j14.8	-25.74+j39.6	(-1.4-j58.6) $\times 10^{-4}$	0.21-j0.099
T_d	(-543-j8.1) $\times 10^{-6}$	(-1.7+j8.3) $\times 10^{-3}$	-0.012+j0.011	(1.23+j3.7) $\times 10^{-6}$	(4.4-j1.3) $\times 10^{-3}$
T_r	-8.11-j8.47	-36.18-j53.8	5.3-j13.8	-3.15+j3.26	-14.4-j17.6
K_r	12.2-j8.5	24.7-j3.7	-2.42+j1.64	0.045+j0.07	1.6-j2.22
K_{PLLr}	-0.05+j0.13	0.01+j0.002	-0.004+j0.003	0.005+j0.037	0.053+j0.08
K_i	-0.74+j0.36	5.67-j1.25	-2.03-j0.81	-0.11-j1.6	0.13+j0.05
T_i	0.78+j0.24	-8.87-j0.71	0.02+j0.03	-0.62+j0.55	0.31+j0.01

表中参数灵敏度的绝对值越大，代表该参数的变化对特征值的影响越大，对系统稳定性的影响也越大。由表 4-3 可知，五组特征值对发电机的暂态时间常数和锁相环增益的灵敏度都很小，说明这两种参数变化时，基本不影响系统的稳定性；特征值 λ_6 与 λ_7 对应着上节所述直流系统的振荡模式，其对直流控制参数 T_r 和 K_r 的灵敏度比较大，说明该模式与整流控制系统相关性较强；特征值 λ_{10} 与 λ_{11} 对应着上节所述低频振荡模式，发电机惯性时间常数 T_j 对它的影响最大。

(1) 发电机惯性时间常数 T_j

保持其他参数不变，逐渐将发电机惯性时间常数 T_j 从 3.5s 减小到 0.2s，系统的主导模态根轨迹如图 4-13 所示。由图可知，在 T_j 逐渐减小的过程中，特征根逐渐向虚轴靠近，系统的稳定裕度逐渐降低，当 T_j 减小到 0.41s 时，系统特征根穿越虚轴进入右半平面，系统将失稳。

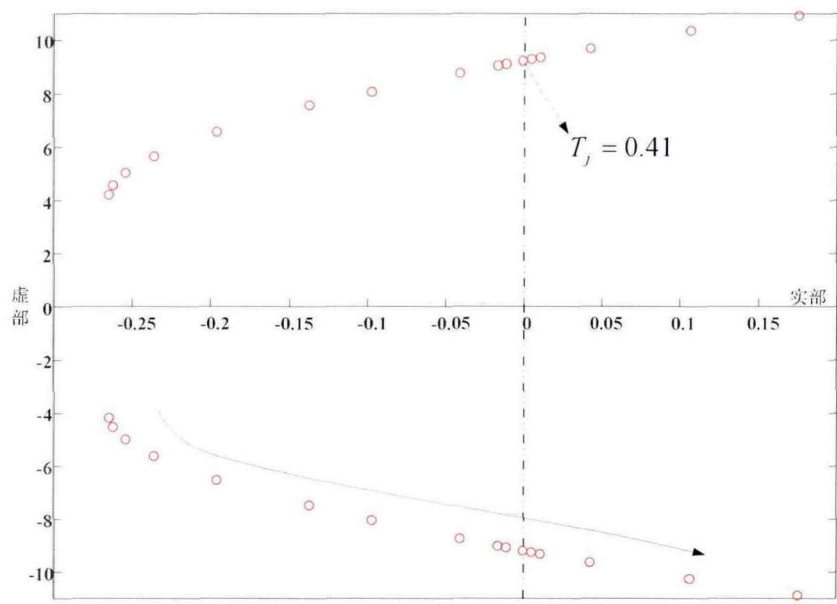


图 4-13 T_j 从 3.5 减小到 0.2 的系统根轨迹

为验证上述根轨迹的正确性，在 PSCAD 中进行如下仿真验证：保持其他参数不变，分别令发电机惯性时间常数 T_j 取值为 0.4s 和 0.43s，在 $t=10\text{s}$ 时刻给系统一相同的小扰动，换流母线电压 E_{acr} 的电磁暂态仿真结果如图 4-14 所示。由图可知，当 $T_j=0.43$ 时，系统在遭受小干扰后仍能缓慢稳定，系统稳定裕度较低；当 $T_j=0.4$ 时，系统在受到小干扰后出现震荡失稳，验证了根轨迹的正确性，同时也说明系统的小信号稳定性会随着 T_j 减小而逐渐降低，而过低的 T_j 取值不仅会降低系统的稳定裕度，甚至会导致系统失稳。

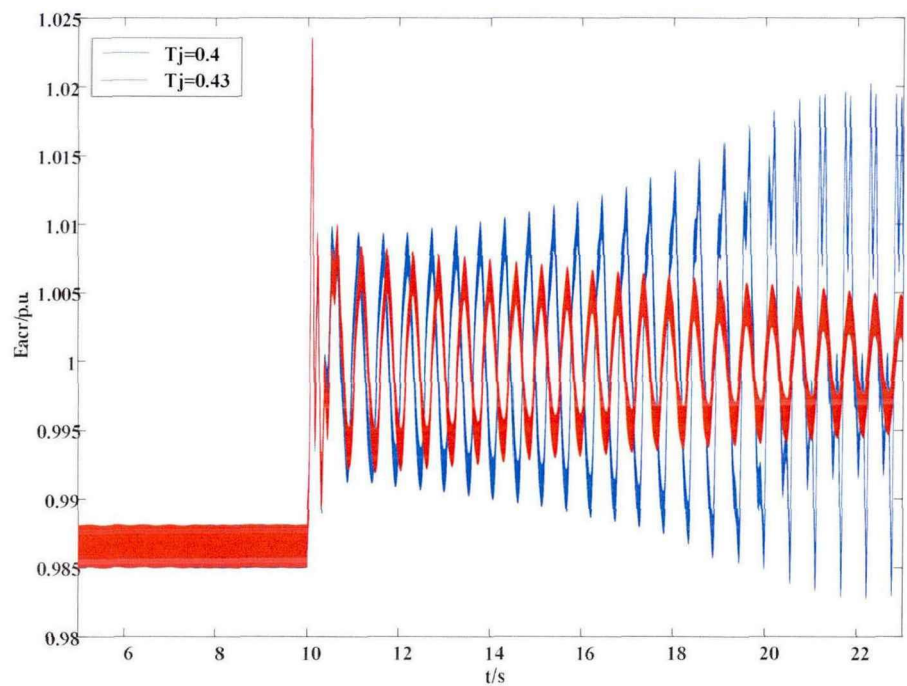


图 4-14 不同 T_j 取值下换流母线电压 E_{acr} 的响应

(2) 励磁系统增益 K_A

保持其他参数不变，逐渐将励磁系统增益 K_A 从 0.2 增大到 200，系统的主导模态根轨迹如图 4-15 所示。由图可知，在 K_A 逐渐增大的过程中，特征根轨迹呈“U 型”，但特征根始终位于虚轴左侧，系统稳定。这说明励磁系统增益 K_A 对系统小信号稳定性影响有限，但在一定范围内增加的 K_A 取值，特征根将远离虚轴，可以提高系统的稳定裕度，因此合理的 K_A 取值将有利于系统的稳定运行。

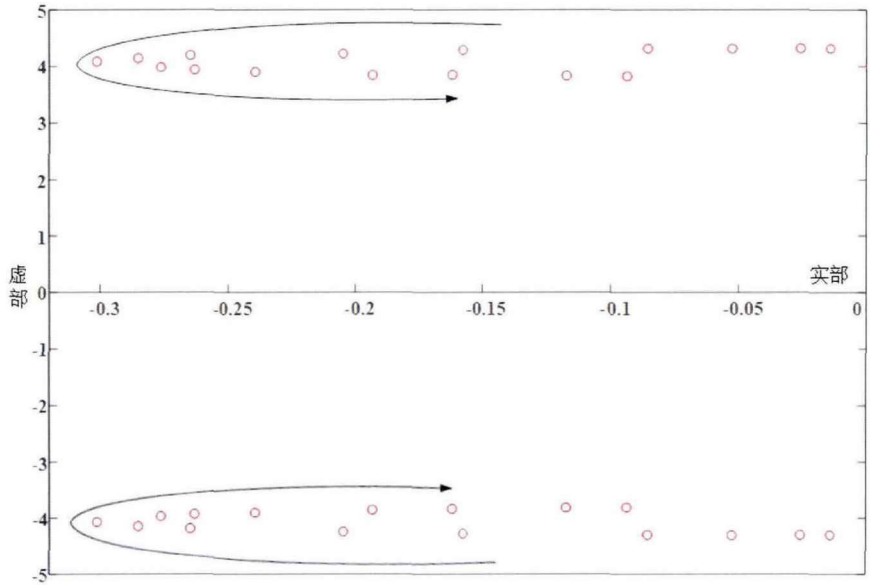
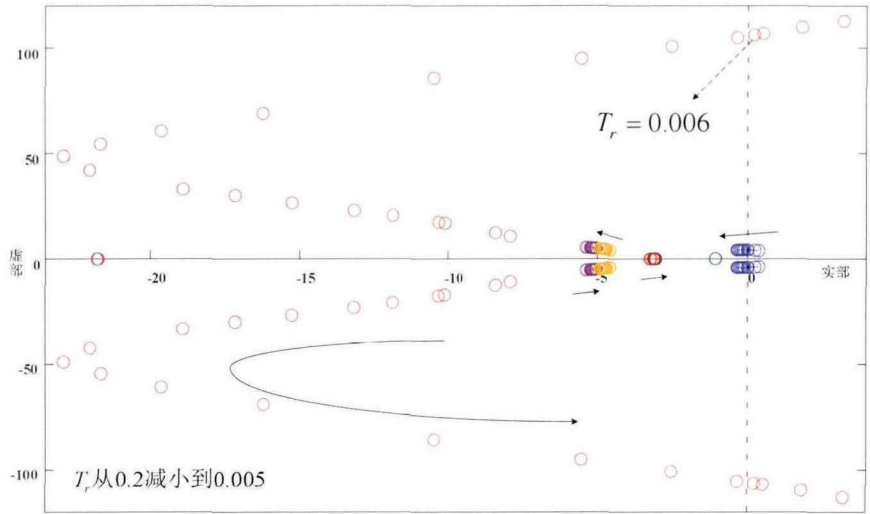


图 4-15 K_A 从 0.2 增大到 200 的系统根轨迹

(3) 整流 PI 控制器积分时间常数 T_r

保持其他参数不变，修改整流 PI 控制器积分时间常数 T_r 从 0.2s 逐渐减小到 0.005s，系统的特征根轨迹如图 4-16 所示,其中图 b)为虚轴附近的局部根轨迹放大图。



a) 系统根轨迹

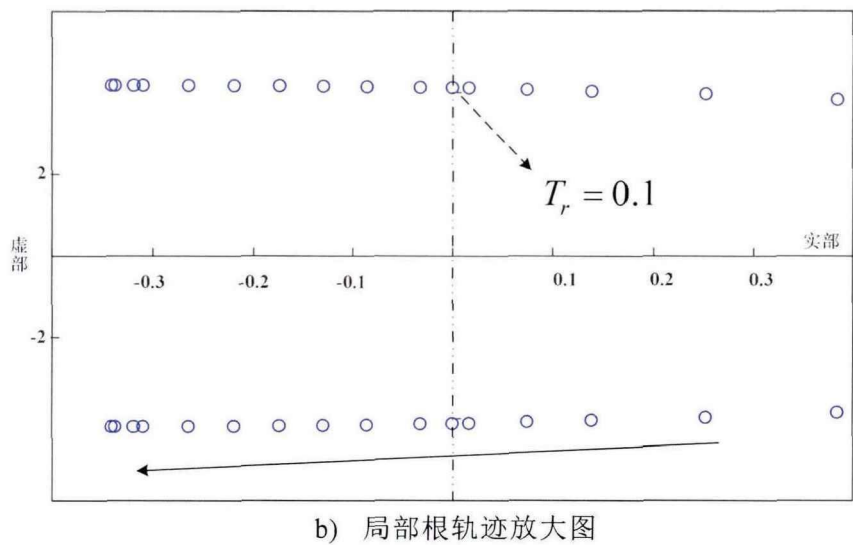


图 4-16 T_r 从 0.2 减小到 0.005 的系统根轨迹

由根轨迹图可知，在 T_r 逐渐减小的过程中，共有两对不同的特征根先后穿越虚轴，即在参数减小过程中存在两种不同的失稳模态。当 $T_r=0.2\text{s}$ 时，系统有一对特征根（蓝色）位于虚轴右侧，此时系统若受到小扰动将失稳，随着 T_r 的减小，该对特征根逐渐向虚轴左侧移动，并在 $T_r=0.1\text{s}$ 时穿过虚轴来到左半平面，此时系统所有特征根都位于虚轴左侧，系统稳定；随着 T_r 的继续减小，另一对特征根（红色）轨迹呈“U 型”，特征根远离虚轴后又开始靠近虚轴，并在 T_r 减小到 0.006s 时穿过虚轴来到右半平面，系统将再次失稳。

为了验证上述根轨迹的正确性，分别在 PSCAD 中进行相应仿真：a) 系统运行于相同的初始稳定状态，保持其他参数不变，在 $t=5\text{s}$ 时刻分别设置 T_r 从 0.01 阶跃到 0.006 、 T_r 从 0.01 阶跃到 0.008 ，整流侧直流电流 I_{dr} 的电磁暂态仿真结果如图 4-17 所示；b) 保持其他参数不变，分别令系统中 T_r 的取值为 0.09 和 0.11 ，在 $t=10\text{s}$ 时刻给系统一相同的小扰动，整流侧直流电流 I_{dr} 的电磁暂态仿真结果如图 4-18 所示。

当 T_r 从 0.01 阶跃到 0.008 时，由根轨迹图可知系统特征根仍在虚轴左侧，说明系统仍能保持稳定，与图 4-17 中直流电流响应曲线一致；当 T_r 从 0.01 阶跃到 0.006 时，由根轨迹图可知系统特征根穿越虚轴来到右侧，电流响应也在 5s 后产生振荡失稳。当 T_r 取值 0.09 时特征根位于虚轴左侧，相应的在图 4-18 中系统在受到小扰动后在经过振荡衰减可以恢复稳定；而当 T_r 取 0.11 时特征根位于虚轴右侧，系统在受到小扰动后会出现振荡失稳现象，分析与仿真结果一致，证明了根轨迹的正确性，同时也说明系统中会出现两种不同的失稳模态。

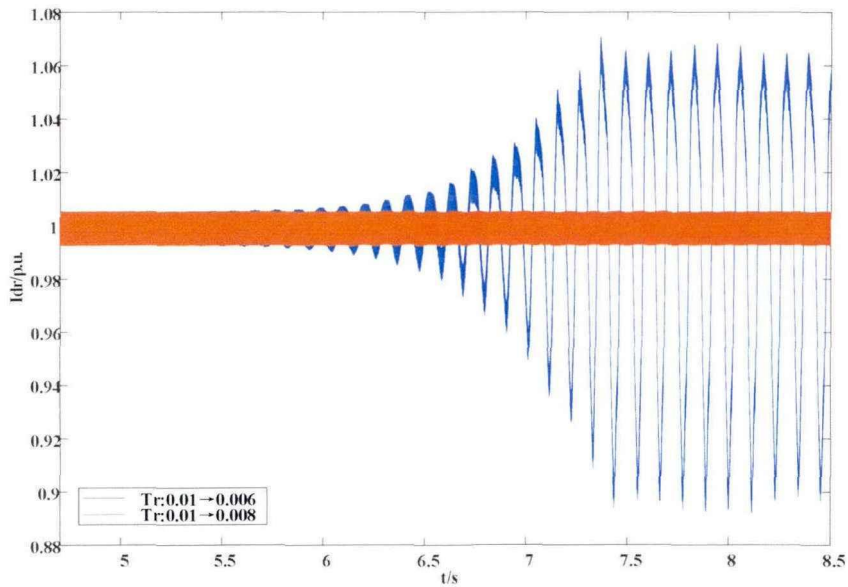


图 4-17 T_r 变化时直流电流 I_{dr} 响应曲线

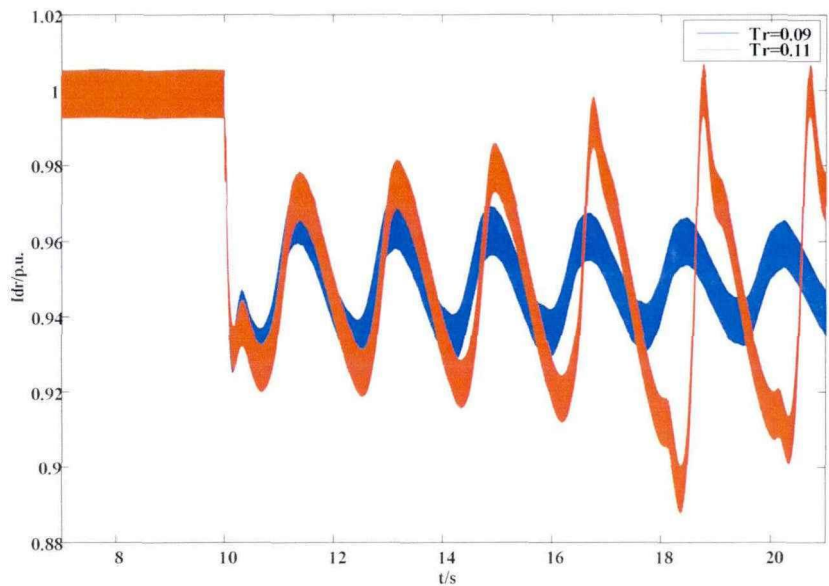
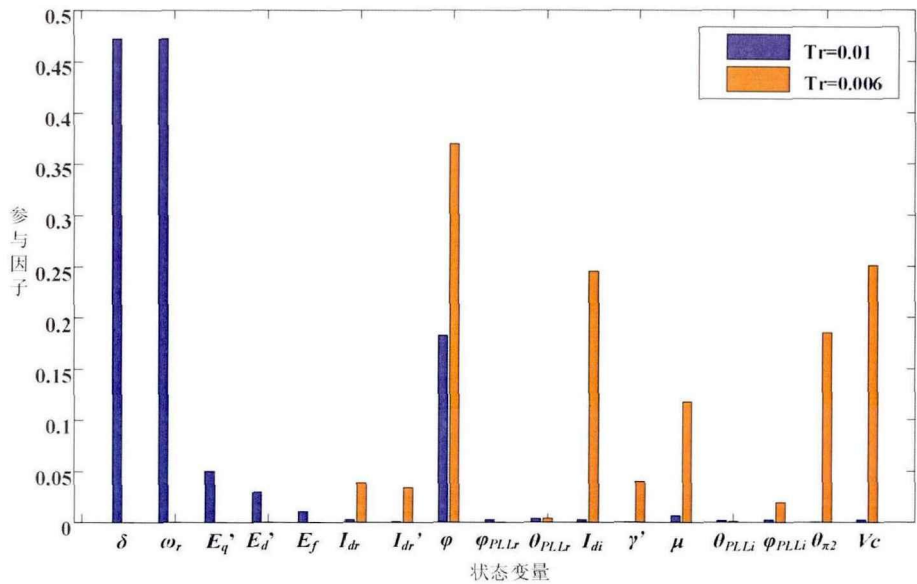
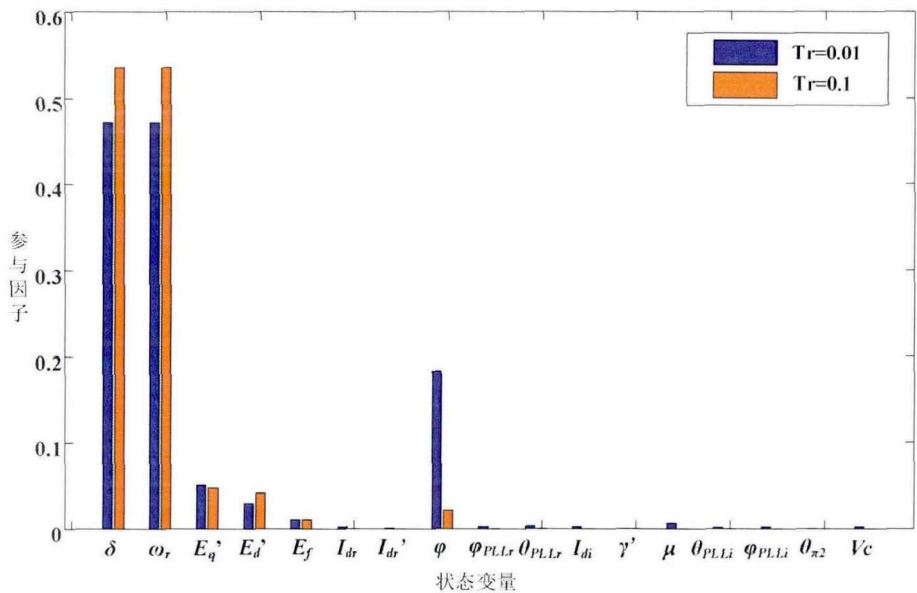


图 4-18 不同 T_r 取值下直流电流 I_{dr} 的响应

将图 4-16 与 LCC-HVDC 系统中的图 4-1 对比可知，对于相同的控制参数 T_r ，在 LCC-HVDC 系统中随着 T_r 的变化仅存在一对穿越虚轴的特征根，系统稳定裕度随着的 T_r 减小而降低，即使系统稳定的 T_r 取值范围仅存在下限值；而在交直流混合系统中，随着 T_r 的变化存在两对先后穿越虚轴的特征根， T_r 过大或过小的取值都会使系统失稳，使系统稳定的 T_r 取值范围变为一个区间，系统稳定性更为复杂。针对上述现象，采用参与因子对交直流混合系统的两种失稳模态进行分析，并与稳定状态下 ($T_r=0.01$) 的参与因子对比，结果如图 4-19 所示。



a) $T_r=0.006$ 与 $T_r=0.01$ 的参与因子



b) $T_r=0.1$ 与 $T_r=0.01$ 的参与因子

图 4-19 参与因子分析

从图中可以看出在 T_r 取不同值时，主导模态中各个状态变量的参与程度不同。由图 a) 可知，与直流系统相关的状态变量的参与程度在 $T_r=0.006$ 时比 $T_r=0.01$ 时显著提高，说明该失稳模态是由直流系统主导的。由图 b) 可知，相对于 $T_r=0.01$ 时的参与因子分布， $T_r=0.1$ 时与发电机相关的状态变量的参与程度变高，而与直流系统相关的状态变量参与程度降低，说明该模态下的失稳主要与发电机相关。

上述分析说明， T_r 的过大或过小取值导致了由发电机或直流系统主导的两种失稳模态。与 LCC-HVDC 系统对比发现，交直流混合系统中由于发电机的加入，

会向系统中添加新的可能穿越虚轴的特征根，系统中将会出现新的失稳模态，使系统稳定运行条件下对于控制参数的取值要求更加严苛，系统稳定性更为复杂。同时也说明，在进行交直流混合系统小信号稳定性分析时，不适合将发电机等效成电压源，否则会使系统参数稳定域的计算结果偏乐观，无法对提高系统运行稳定性给出正确的指导。

(4) 逆变侧交流系统短路比 SCR

系统短路比 SCR 是表征系统短路容量除以设备容量的参数，短路比数值越大代表所接入的系统越强，可以研究系统的强度对小信号稳定性的影响。保持其他参数不变，逐渐将逆变侧交流系统的 SCR 从 2 增大到 5，系统虚轴附近的根轨迹如图 4-20 所示。由图可知，在 SCR 的变化过程中，有一对特征根穿越了虚轴，其他特征根变化范围较小。当 SCR=2 时，主导模态特征根位于虚轴右侧，随着 SCR 的逐渐增大，特征根逐渐向左移动靠近虚轴，并在 SCR 取 2.3 时穿过虚轴，系统将恢复稳定。根据根轨迹图可以得出结论：当与弱系统相连时，系统的稳定裕度低，容易出现失稳现象。

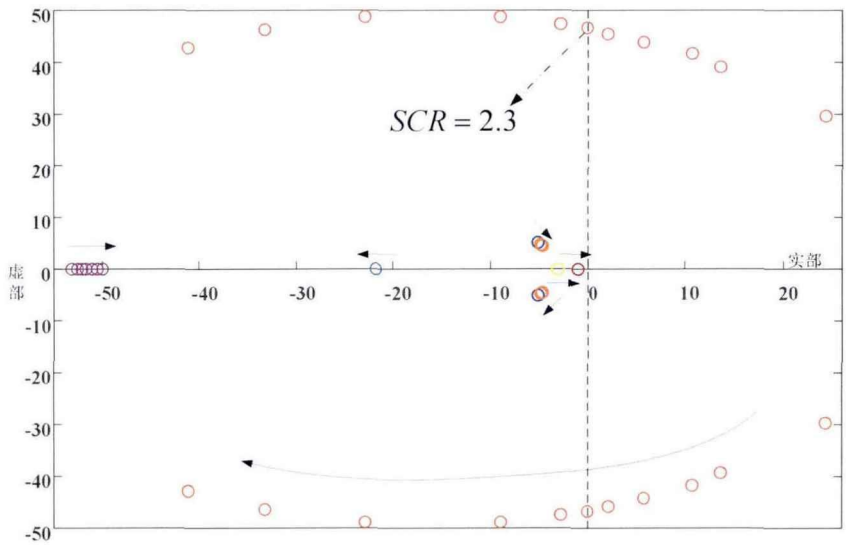


图 4-20 SCR 从 2 增大到 5 的系统根轨迹

为了验证上述根轨迹的正确性，在 PSCAD 中进行如下仿真验证：保持其他参数不变，分别取逆变侧交流系统 SCR 为 2.4 和 2.2，整流侧直流电流 I_{dr} 的电磁暂态仿真结果如图 4-21 所示。由图中电流响应可知，当 SCR=2.4 时，系统稳定；而当 SCR=2.2 时，特征根位于虚轴右侧，系统产生了振荡，分析与仿真结果一致，验证了上述根轨迹的正确性。

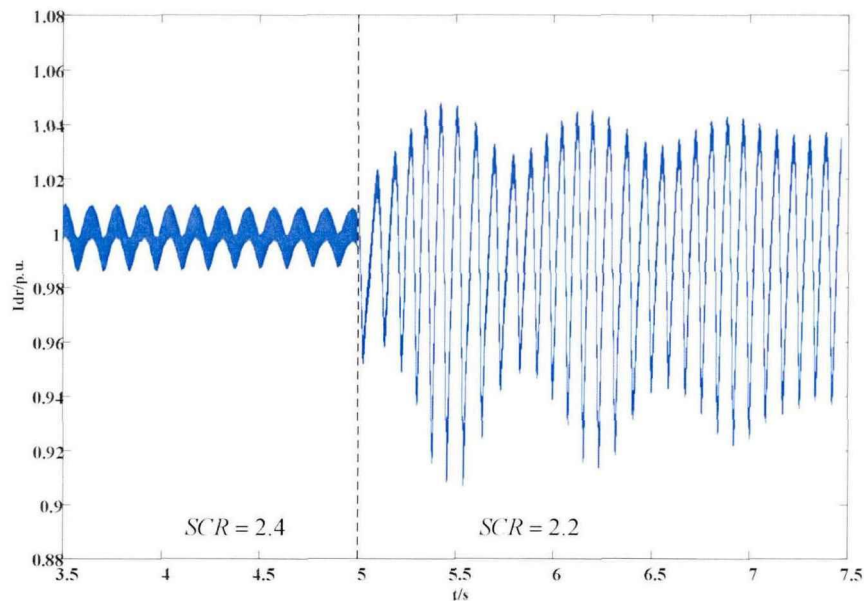


图 4-21 不同 SCR 取值下直流电流 I_{dr} 的响应

4.3.3 交直流混合系统控制参数稳定域

为提高交直流混合系统的运行稳定性，研究交直流混合系统控制参数的可调范围，使用 SSM-CVV 模型计算发电机惯性时间常数 T_J 与励磁增益 K_A 的稳定域、惯性时间常数 T_J 与直流 PI 控制器积分时间常数 T_r 的稳定域分别如图 4-22 与图 4-23 所示。

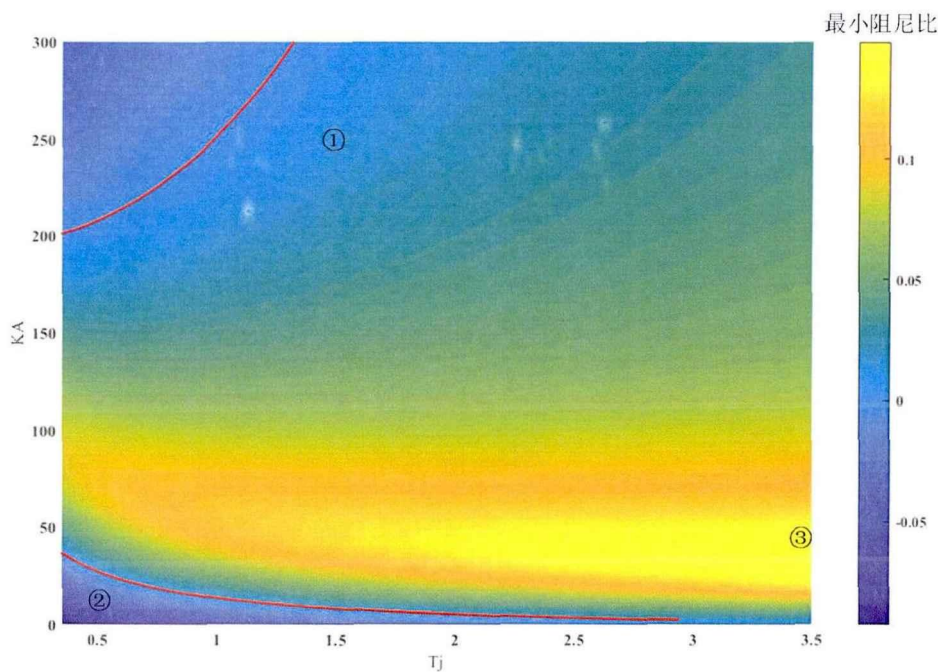
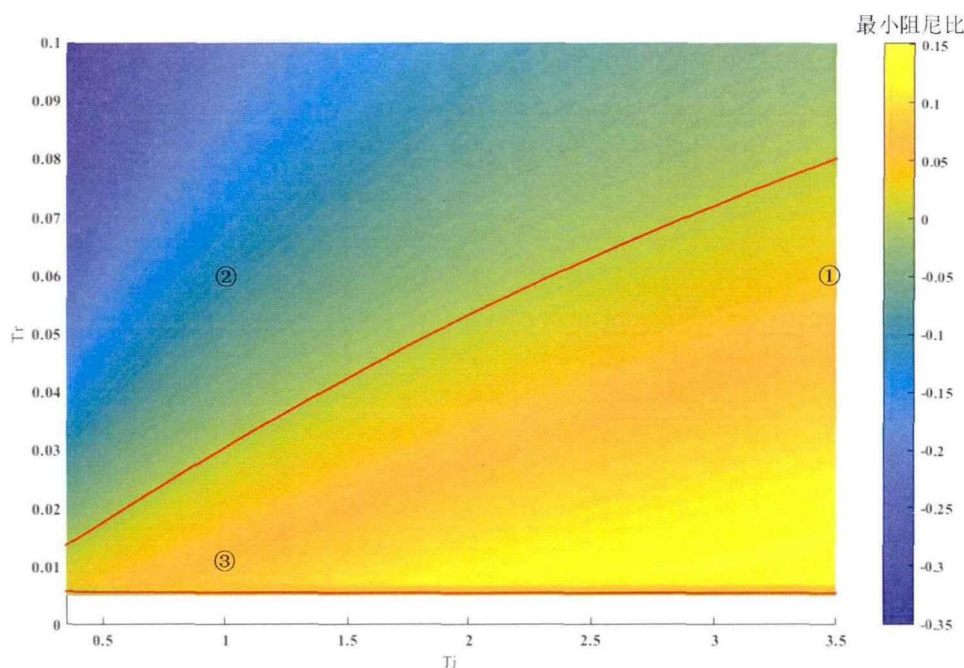


图 4-22 T_J 与 K_A 的稳定域

图 4-23 T_j 与 T_r 的稳定域

在上图的稳定域中，黄色区域代表该参数组合下系统的最小阻尼比为正，系统稳定且颜色越深系统稳定性越高；蓝色区域代表该参数组合下系统的最小阻尼比为负，系统在遭受小干扰后将失稳；图中红线表示该参数取值下系统的最小阻尼比为 0，即红线为系统的稳定边界。为验证计算的控制参数稳定域的正确性，在 PSCAD 中进行如下的电磁暂态仿真：a) 保持其他参数不变， T_j 与 K_A 参数组合取值分别为稳定域中 1 号点 ($T_j=1.5, K_A=250$)、2 号点 ($T_j=0.5, K_A=10$) 和 3 号点 ($T_j=3.5, K_A=50$) 时，系统在 10s 时刻遭受相同小干扰，直流有功功率 P_d 的响应曲线如图 4-24 所示；b) 保持其他参数不变， T_j 与 T_r 参数组合取值分别为稳定域中 1 号点 ($T_j=3.5, T_r=0.06$)、2 号点 ($T_j=1, T_r=0.06$) 和 3 号点 ($T_j=1, T_r=0.01$) 时，系统在 10s 时刻遭受相同小干扰，直流有功功率 P_d 的响应曲线如图 4-25 所示。

由稳定域对应的系统响应曲线可知，稳定域中 2 号点位于蓝色区域，系统在遭受小干扰后产生振荡失稳；而 1 号点和 3 号点位于黄色区域，系统在遭受小干扰后仍能恢复稳定，且 3 号点参数组合对应的最小阻尼比大于 1 号点，3 号点对应的响应曲线恢复稳定速度更快，说明系统的阻尼更强，计算结果与仿真一致，验证了控制参数稳定域的正确性。

由上述分析可知，在交直流混合系统中，可以利用直流控制系统快速响应的特点及时调整控制参数来抑制低频振荡，同时在系统运行过程中控制参数的调整不应超过稳定域中的红色边界，应尽可能使参数取值靠近黄色区域，在这种取值

下系统的小信号稳定性强，有利于系统的稳定运行。

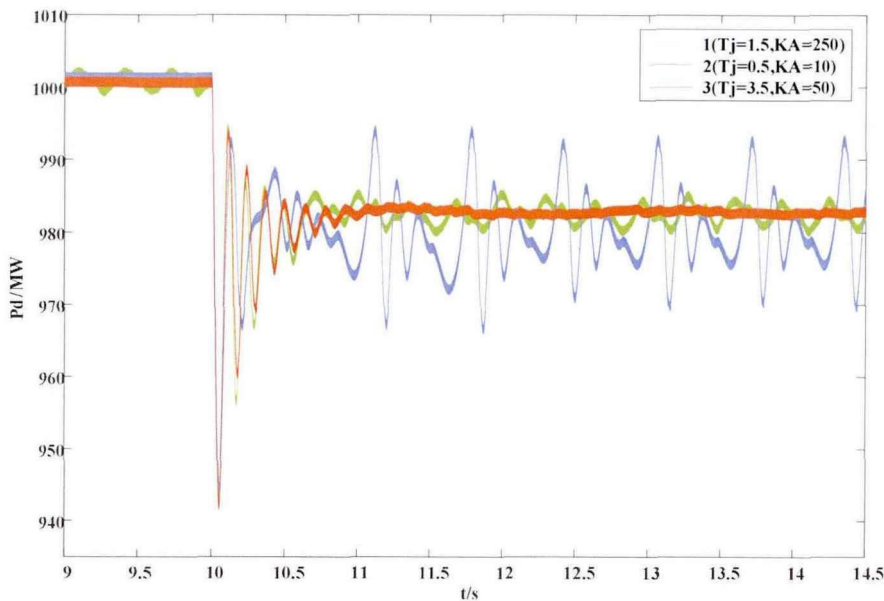


图 4-24 T_j 与 K_A 稳定域对应的 P_d 响应曲线

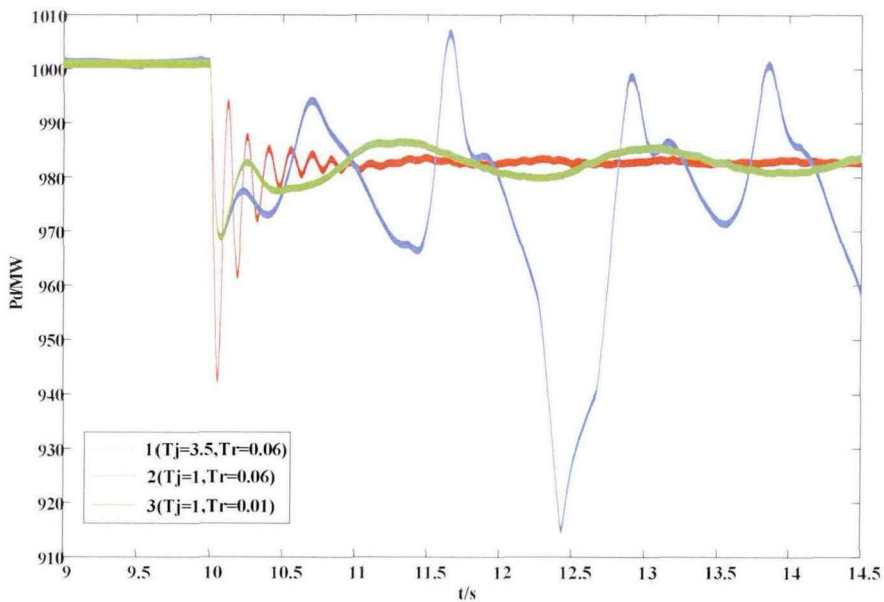


图 4-25 T_j 与 T_r 稳定域对应的 P_d 响应曲线

4.4 本章小结

本章基于 SSM-CVV 模型，分别对 LCC-HVDC 系统与交直流混合系统的小信号稳定性进行了分析，研究了参数对系统稳定性的影响，计算了系统控制参数稳定域。结论如下：

(1) 对于 LCC-HVDC 系统，系统的小信号稳定性会随着控制器积分时间常数 T_r 的减小而逐渐降低，过低的 T_r 取值不仅会降低系统的稳定裕度，甚至会导

致系统失稳；控制器比例增益 K_i 的取值变化时，系统的根轨迹呈“U 型”，在一定范围内增加的 K_i 取值，系统的稳定性将得到提高，而进一步增加 K_i 将导致系统稳定裕度降低。

(2) 在遭受小干扰后交直流混合系统中会出现两种振荡：直流振荡与低频振荡，直流振荡模态对应的阻尼比较大，恢复稳定较快；低频振荡模态对应的阻尼较小，衰减缓慢；包含换流母线在内的交流系统中都会产生持续的低频振荡，而由于自身控制系统的作用，直流系统基本不受低频振荡的影响，可以利用直流控制系统快速响应的特点及时调整控制参数来抑制低频振荡。

(3) 交直流混合系统由于发电机的加入，向系统中添加了新的可能穿越虚轴的特征根，系统中将出现新的失稳模态，使系统稳定的 T_r 取值范围变为一个区间，系统稳定性更为复杂；发电机、励磁系统的控制参数和系统强弱程度也会影响交直流混合系统的小信号稳定性，惯性时间常数 T_f 与励磁增益 K_A 的合理取值将有利于提高系统稳定性，而与弱系统相连条件下系统的稳定裕度低，容易出现失稳现象。

(4) 本章计算的 LCC-HVDC 系统与交直流混合系统的控制参数稳定域揭示了系统控制参数与系统稳定性的关系，可以为提高系统的运行稳定性提供指导：为保证系统稳定运行，参数调整范围不应超过稳定域中的边界，并且参数取值应尽可能保证所对应的最小阻尼比较大，此时系统的运行稳定性强。

第 5 章 总结与展望

5.1 结论

当前大部分研究在对含 LCC-HVDC 的交直流混合系统进行小信号稳定性分析时,都是忽略发电机对系统的影响,把系统中的发电机等效成电压源,着重研究直流控制系统对稳定性的影响,同时研究中使用的小信号模型精度也有待提高。本文提出了一种考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号建模方法,使用该方法建立的小信号模型精度高,并用该小信号模型对交直流混合系统的小信号稳定性进行了分析。本文主要结论如下:

(1) 对交直流混合系统的小信号建模与分析方法进行了研究。采用模块化建模的思想,将交直流混合系统分为了交流子系统和直流子系统分别建模,交流系统建立了同步发电机、励磁系统和交流网络的小信号模型,直流系统建立了直流线路、换流器、触发角控制器和锁相环的小信号模型。各子系统独立建模,通过接口变量连接得到交直流混合系统的小信号模型 SSM,便于系统改变时模型的修改。选用节点注入功率分量与电压的幅值相角来描述交流网络和换流器,物理意义更加明确,可以简化小信号模型的建立过程,便于计算机建模。

(2) 提出了考虑电压动态过程的小信号建模方法。研究了电压动态过程对小信号模型 SSM 的影响。分析发现在系统遭受小干扰后换流器网侧电压的动态过程将使其内部角度关系不再严格成立,小信号模型将出现误差。为消除误差提高模型精度,对 SSM 模型进行了改进,建立了考虑电压动态过程的小信号模型 SSM-CVV,向模型中加入了新的状态方程并修正了逆变侧换流器内部的角度关系与关断角 γ 的表达式。相比于 SSM 模型,本文提出的 SSM-CVV 模型能够精确描述系统遭受小干扰后的暂态过程,且对系统振荡频率等信息计算更为准确,显著提高了小信号模型的精度。在进行小信号稳定性分析时,SSM-CVV 模型可以准确计算出系统的临界参数,在稳定边界附近得到准确的分析结果,适合用来进行系统的小信号稳定性分析。

(3) 使用考虑电压动态过程的 SSM-CVV 模型分析了交直流混合系统的小信号稳定性。通过根轨迹和参与因子分析法研究了参数对系统稳定性的影响,分析结果表明由于发电机的加入,向交直流系统中添加了新的可能穿越虚轴的特征根,系统中将出现新的失稳模态,系统稳定性更为复杂。遭受小干扰后交直流混合系统中会出现直流振荡与低频振荡两种振荡,直流振荡对应的阻尼比大,衰减速度快;低频振荡对应的阻尼比小,会在交流系统中产生持续时间较长的低频振

荡，但直流系统由于自身控制系统的作用基本不受低频振荡的影响，可以利用直流控制系统快速响应的特点及时调整控制参数来抑制低频振荡。以最小阻尼比为指标计算了控制参数稳定域，参数稳定域揭示了系统控制参数与系统稳定性的关系，控制参数可以根据本文所计算的稳定域进行合理调节，从而提高系统的运行稳定性。

5.2 展望

本文的研究内容还可以在以下方面进行深入研究：

(1) 本文提出的考虑电压动态过程的交直流混合系统小信号模型，还可以加入 PSS 模型，进而完善同步发电机的控制系统，深入研究交直流混合系统对低频振荡的抑制方法。

(2) 本文采用的是典型的单机系统模型，在后续研究中可以对多机大系统、直流线路并联、交直流线路并联等不同场景下的交直流混合系统进行小信号稳定性分析，深入探究在遭受小干扰后交直流系统之间的相互作用。

参考文献

- [1] Kwon D, Kim Y J, Moon S I. Modeling and Analysis of an LCC HVDC System Using DC Voltage Control to Improve Transient Response and Short-Term Power Transfer Capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(04):1922-1933
- [2] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(07):1-10+25
- [3] 李勇. 强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3756-3760
- [4] Tang G F, He Z Y, Pang H. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy System, 2015, 1(2):22-35
- [5] Zhang L D, Harnefors L, Nee H P. Modeling and Control of VSC-HVDC Links Connected to Island Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2):783-793
- [6] 王康, 金字清, 甘德强, 等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(05):10-19
- [7] 付强, 杜文娟, 王海风. 交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10):2829-2840+3134
- [8] 贺杨焱, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 交直流混联电网 LCC-HVDC 换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3119-3130
- [9] 贺永杰, 向往, 周家培, 等. LCC-MMC 串联型混合直流输电系统小信号建模[J]. 电工技术学报, 2021, 36(07):1492-1506
- [10] 郑旭. 特高压直流输电对系统安全稳定的影响及对策[D]. 武汉:武汉大学, 2016
- [11] 黄星海. 采用电网换相换流器的高压直流系统控制参数整定方法研究[D]. 广州:华南理工大学, 2020
- [12] Jovcic D, Pahalawaththa N, Zavahir M. Analytical modelling of HVDC-HVAC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2):506-511
- [13] Jovcic D, Pahalawaththa N, Zavahir M. Small signal analysis of HVDC-HVAC interactions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2):525-530
- [14] Guo C Y, Zhao C Y, Iravani R, et al. Impact of phase-locked loop on small-signal dynamics of the line commutated converter-based high-voltage direct-current station[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5):1311-1318

- [15] Guo C Y, Yin Z H, Zhao C Y, et al. Small-signal dynamics of hybrid LCC-VSC HVDC systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 98:362-372
- [16] Karawita C, Annakkage U D. Control block diagram representation of an HVDC system for sub-synchronous frequency interaction studies[C]. Proceedings of the 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London: IET, 2011
- [17] 甄自竞, 杜文娟, 王海风. 多馈入高压直流输电系统小干扰稳定分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11):29-36
- [18] Zhang H L, Yao S J, Zhan P. Research on small-signal stability of hybrid multi-terminal HVDC system and control system parameter design[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13):2401-2406
- [19] 陈威, 叶运铭, 周保荣, 等. 定电压与预测型定关断角控制对 HVDC 小干扰稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18):98-111
- [20] Pinto R T, Rodrigues S, Bauer P, et al. Operation and control of a multi-terminal DC network[C]. Ecce Asia Downunder. IEEE, 2013
- [21] 王晓辉, 陈庆军, 张彦涛, 等. 特高压直流分层接入的稳定性模态分析方法[J]. 电网技术, 2018, 42(09):2869-2878
- [22] Karawita C, Annakkage U D. Multi-infeed HVDC interaction studies using small-signal stability assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 910-918
- [23] Qi Y, Zhao H F, Fan S T, et al. Small signal Frequency-Domain model of a LCC-HVDC converter based on an infinite Series-Converter approach [C]. IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). IEEE, 2020
- [24] 周攀, 刘天琪, 王顺亮, 等. 考虑谐波耦合特性的 LCC-HVDC 换流站小信号建模[J]. 电网技术, 2021, 45(01):153-161
- [25] Osauskas C, Wood A. Small-signal dynamic modeling of HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1):220-225
- [26] 曾志杰, 肖华锋, 高博, 等. 并网逆变器小信号建模简化方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21):7002-7012
- [27] 袁辉, 辛焕海, 王康, 等. 弱电网下远端严重电压跌落时逆变器并网失稳机理分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22):38-43+117+44-46
- [28] Lu J, Yuan X M, Hu J B, et al. Motion equation modeling of LCC-HVDC station for analyzing DC and AC network interactions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1563-1574
- [29] 王磊, 邓新昌, 侯俊贤, 等. 适用于电磁暂态高效仿真的变流器分段广义状态

- 空间平均模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3130-3139
- [30] 王鹏, 刘天琪, 王顺亮, 等. 水电机组超低频振荡小信号模型及影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18):5942-5955
- [31] Farrokhhabadi M, Canizares C A, Simpson-Porco J W, et al. Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, PP(99):1-1
- [32] 刘焱, 孔力, 邓卫, 等. 含双有源桥式 DC-DC 变换器的多端直流系统稳定性分析[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(10):10-19
- [33] Li C, Burgos R, Tang Y, et al. Application of D-Q frame impedance-based stability criterion in power systems with multiple STATCOMs in proximity[C]. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2017
- [34] Kwon D, Kim Y J, Moon S I. Modeling and Analysis of an LCC HVDC System Using DC Voltage Control to Improve Transient Response and Short-Term Power Transfer Capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(4):1922-1933
- [35] 黄伟煌, 李明, 郭铸, 等. 基于小干扰稳定性的多端混合高压直流输电系统控制参数分析与优化方法[J]. 电网技术, 2020, 44(08):2941-2949
- [36] 郑安然, 郭春义, 殷子寒, 等. 提高弱交流系统下混合多端直流输电系统小干扰稳定性的控制参数优化调节方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(06):1336-1345
- [37] Shao Y, Tang Y. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems using small-signal stability assessment[C]. IEEE PES T&D 2010. IEEE, 2010
- [38] 李晨辉, 黄冬, 刘国栋. 交直流混联系统小干扰稳定性分析[J]. 吉林电力, 2019, 47(03):33-36+39
- [39] Oni O E, Swanson A G, Carpanen R P. Small Signal Stability Analysis of a four Machine System with Strategic Placement of Monopolar LCC-HVDC link[J]. Journal of Energy in southern Africa, 2020, 31(1):73-87
- [40] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 清华大学出版社, 2002
- [41] 徐龙. 锁相环动态影响交直流系统小干扰稳定性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019
- [42] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. 中国电力出版社, 1994
- [43] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine eigenvalue sensitivities of power system parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 15(2):741-747
- [44] 杨洁. 多端柔性直流输电系统小信号模型及解耦控制[D]. 武汉:武汉大学, 2015

- [45] Chen J Z, Chen L, Chen Y P. Trajectory Analysis of Time Delay for Frequency Oscillation Mode of Power System Based on Pade Approximation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14):120-125

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

（一）发表的学术论文

- [1] 第一作者. LCC-HVDC Small Signal Model Considering the Influence of Voltage Variation[C]. 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), May 28-30, 2021, Wuhan, China. (EI 收录)
- [2] 第三作者. 基于贝叶斯理论的考虑多维风速之间相关性的概率潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(03):157-165.

（二）参与的项目

- [1] 南方电网科学研究院科技项目, 基于先进控制系统的高压直流故障响应建模研究. 2018.12-2021.06, 主研人.

致 谢

光阴似箭，我即将结束三年的研究生学习时光，这也意味着我的学生时代即将画上句号。回顾研究生阶段的学习与生活，获得了众多师长同辈的帮助与支持，在此向他们致以衷心的感谢。

首先，我衷心地感谢我的导师刘崇茹教授在我读研期间对我的指导与教诲。我的科研能力较差，在科研过程中遇到了不少的困难，但每次在刘老师的交流中，老师都会帮我指明方向、理清思路。刘老师不仅在科研上给予我指导，她的言传身教也使我终身受益，她在做事时精益求精的态度，工作中废寝忘食的精神都为我今后的人生道路树立了榜样。在感谢刘老师的同时，也祝愿老师在繁忙的工作中注意休息，无论在科研还是学校工作中都能更进一步。

同时，我要感谢课题组的郑乐老师、苏晨博师兄、黎晓师兄、王洁聪师姐、王宇师兄、刘昊宇师兄、喻建瑜师兄，同门侯延琦、谢爵昊、沈金乙、单俊儒以及师弟师妹们，是他们在我的科研工作中给予了我巨大的帮助与鼓励，能成为这个温暖大家庭的一份子，我感到十分的荣幸与感激。我还要感谢我的小伙伴王铭灏、国兴超和赵阳，正是与他们的相处让我在紧张的科研生活中感受到快乐与精神支持。我要感谢我的舍友王栋、袁轩、杨彬和韩其林，与他们在一起的宿舍生活充满了家的温暖，每次回到宿舍都可以让我忙碌一天的身心得到放松与愉悦。

我要特别感谢我的父母，感谢他们一直以来对我无私的支持与爱护，无论我做什么决定他们都会站在我这边，他们的理解与支持是我一路以来的后盾。同时我要感谢远方的彭老师，他的帮助与指导也给迷茫无措的我带来了巨大的支持与希望。

最后，向在百忙之中抽出宝贵的时间评阅本文和参加答辩的各位专家老师致以最珍贵的谢意。