

# 华北电力大学

博士学位论文

高压直流系统动态相量建模与控制策略研究

**Research on Dynamic Phasor Modelling and Control  
Strategy of High Voltage Direct Current System**

赵云灏

2017年6月



国内图书分类号：TM71

国际图书分类号：621.3

学校代码：10079

密级：公开

## 博士学位论文

# 高压直流系统动态相量建模与控制策略研究

博士研究生：赵云灏

导师：李庚银教授

副导师：刘崇茹教授

申请学位：工学博士

学科：电气工程

专业：电力系统及其自动化

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2017年6月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM71

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Doctoral Degree in Engineering

**Research on Dynamic Phasor Modelling and Control  
Strategy of High Voltage Direct Current System**

<b>Candidate:</b>	Zhao Yunhao
<b>Supervisor:</b>	Prof. Li Gengyin
<b>Vice Supervisor</b>	Prof. Liu Chongru
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Doctor of Engineering
<b>Speciality:</b>	Power System and Its Automation
<b>School:</b>	School of Electrical and Electronic Engineering
<b>Date of Defence:</b>	June, 2017
<b>Degree-Conferring-Institution:</b>	North China Electric Power University

## 摘要

为了服务我国经济社会的高速发展，同时充分利用我国中西部地区的煤炭、水利、风、光等一次能源，我国电网经历了数十年的高速发展，已经形成了中西部能源中心集中，中东部负荷中心集中，西电东送，南北互联，交直流系统并列运行的基本网架结构。

针对我国交直流系统以及风电的发展，为了为交直流系统动态过程分析提供新的建模与仿真方法，并为高压直流系统（High Voltage Direct Current System, HVDC system）紧急功率支援和高压直流系统跟随风电功率波动的运行方式提供合理的控制策略，本论文重点研究了能反应高压直流系统换流器谐波特性的高压直流系统动态相量建模、反应交流系统不对称故障状态下直流系统动态特性的高压直流系统三相动态相量建模、含电力电子装置的电力系统和交直流系统电磁-动态相量混合仿真方法以及基于自适应动态面控制的直流系统紧急功率支援控制策略和基于定功率控制的直流系统跟随风电功率波动控制策略，其主要内容如下：

（1）根据动态相量理论，提出了一种反映直流系统换流器谐波特性的直流系统动态相量模型，该模型包括完整的直流系统换流器动态相量模型，直流线路动态相量模型以及控制器模型；并分析了直流系统动态相量模型的仿真过程；仿真对比分析表明，所提动态相量模型能在使用代数模型形式的换流器动态相量模型及较大仿真步长的情况下反应直流系统的动态特性，尤其是直流系统换流器对交流系统的谐波特性。完善了直流系统动态相量模型。

（2）为扩展直流系统动态相量模型的适用性，建立了适应交流系统不对称状态的直流系统三相动态相量模型，该模型包括完整的直流系统换流器动态相量模型，直流线路动态相量模型以及控制器模型；并分析了该动态相量模型的仿真过程；仿真对比分析表明，所提动态相量模型能在使用代数模型形式的换流器三相动态相量模型以及较大仿真步长的情况下，反应交流系统不对称故障时，直流系统的动态特性。扩展了直流系统动态相量模型的在交流系统不对称状态下的应用。

（3）为充分发挥电磁暂态建模仿真方法和动态相量建模仿真方法各自在建立交流系统模型和电力电子装置模型的优势，提出了含电力电子装置的电力系统中，电力电子装置使用动态相量模型，交流系统使用电磁暂态模型的电磁-动态相量混合仿真，分析了混合仿真中模型区域划分及相互等效方法，并以交直流系统为例分析了电磁-动态相量混合仿真的具体流程；使用所提反映直流系统换流

器谐波特性的直流系统动态相量模型实现了交直流系统的混合仿真。对比分析,所提混合仿真方法能在使用比电磁暂态模型简单的动态相量模型以及较大仿真步长的情况下,反应交直流系统的动态特性。为含电力电子装置的电力系统提供了新混合仿真方法。

(4) 提出了一种基于自适应动态面控制的直流系统广域紧急功率支援控制策略,该策略根据广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)测量的交直流系统全局信息,利用交直流系统惯量中心(Center of Inertia, COI)等值模型,使用动态面控制策略和自适应控制理论进行设计,能处理系统未知建模误差和外界干扰的,使用李亚普诺夫函数法理论证明了所提控制策略下交直流系统的稳定性。对所提控制策略进行了仿真分析,时域仿真分析结果表明,该直流系统紧急功率支援控制策略对系统不同运行方式和不同故障有较好的自适应性和鲁棒性,对信号时滞具有较好的鲁棒性;同时其效果优于传统的零极点配置方法及反步法设计的直流系统附加控制策略。

(5) 研究了在“风火打捆”经直流外送系统中,将调峰调频能力较弱的送端地区因风电功率引起的功率波动转移到调峰调频能力强的受端地区的,基于定功率控制策略的直流系统跟随风电功率波动的控制技术;同时,研究了直流系统输送功率随风电功率波动时,减少直流系统常规无功补偿装置频繁动作的利用 SVC 替代常规无功补偿装置的方案以及 SVC 和常规无功补偿装置的协调控制策略。对所提控制策略进行了仿真分析,仿真结果表明,所提控制策略是可行和有效的。

**关键词:** 高压直流输电系统; 交直流系统; 风力发电; 动态相量; 电磁暂态; 混合仿真; 紧急控制; 动态面控制; 无功控制

---

---

## Abstract

In order to serve the rapid development of economical society of our country, and make use of the coal, hydropower, wind, light and other primary energy in the Central and Western China, the power grid of our country has been developed fast in the last decades and become a grid with the structure that most of energy center is located in the Central and Western China and load center is located in the Central and Eastern China, electricity is transmitted from the western areas to Eastern China, the northern power grid is connected with the southern power grid together, the AC and DC system operate parallellly.

Mainly for the development of the AC and DC system and the wind power in the power grid of our country, in order to supply a new modelling and simulation method for the AC and DC system dynamic performance analysis and reasonable High Voltage Direct Current (HVDC) system emergency power support control strategy and the transmitted power of the HVDC system follow the fluctuation of wind power control strategy, the paper focuses on the dynamic phasor modelling of HVDC system which can reflect the harmonic characteristic of converter, the three-phasor dynamic phasor modelling of HVDC system which can reflect the dynamic characteristic of HVDC system under asymmetrical faults of AC system, electromagnetic-dynamic phasor hybrid simulation of the power system with power electronic device and AC-DC system and the HVDC system emergency power support control strategy based on adaptive dynamic surface control and the transmitted power of the HVDC system follow the fluctuation of wind power control strategy based on constant power control strategy, the contents as follows:

(1) An HVDC system dynamic phasors model including the model of converter, DC line and controller based on dynamic phasors theory which can reflect the harmonic characteristic of the converter of HVDC system is proposed, and the simulation process of HVDC system dynamic phasors model is analyzed. The simulation results show that the proposed HVDC system dynamic phasors model can reflect the dynamic performances of the HVDC system, especially the harmonic characteristics of the converter in AC system side, when the dynamic phasor model of converter which is a algebraic model and a large simulation step are used. This proposed model improve the modelling of HVDC system based on dynamic phasor.

(2) In order to improve the applicability of the HVDC system dynamic phasors model, a HVDC system three-phasor dynamic phasor model including the model of converter, DC line and controller used under AC system asymmetrical condition is proposed, and the simulation process of HVDC system three-phasor dynamic phasors model is analyzed. The simulation results show that the proposed HVDC system

---

three-phasor dynamic phasor model can reflect the dynamic performances of the HVDC system under AC system asymmetrical condition when the dynamic phasor model of converter which is a algebraic model and a large simulation step are used. This proposed HVDC system three-phasor dynamic phasors model improve the applicability of HVDC system under asymmetrical condition of AC system.

(3) In order to take advantage of the electromagnetic transient modelling method in building the model of AC system and the dynamic phasors modelling method in building the model of power electronic device, a electromagnetic transient - dynamic phasor hybrid simulation method of power system with power electronic device where the electromagnetic transient model and dynamic phasor model are used to build the model of AC system and power electronic device respectively is proposed, model partition and mutual equivalent method are analysed, and the AC-DC system is used as an example to analyse the simulation process of electromagnetic transient - dynamic phasors hybrid simulation. The electromagnetic transient - dynamic phasor hybrid simulation of AC-DC system is achieved by using the proposed dynamic phasor model of HVDC system which can reflect the harmonic characteristics of the converter of HVDC system. The simulation results show that the proposed hybrid simulation can reflect the dynamic characteristics of AC-DC system by using the dynamic phasors model which is simpler than electromagnetic model and a large simulation step. A new hybrid simulation method of the power system with power electronic device is proposed.

(4) An HVDC wide area emergency power support control strategy based on adaptive dynamic surface control is proposed. This strategy which can deal with the unknown modelling error and external disturbance is designed by using the center of inertia (COI) equivalent model of AC-DC system based on the global information of AC-DC system measured by the wide area measurement system (WAMS) and the dynamic surface control strategy and adaptive control theory. The stability of the AC-DC system controlled by the control strategy is proved based on Lyapunov function method. The simulation analysis of this proposed control strategy is made and the simulation results show that this control strategy is adaptive and robustness for different operation modes and faults and robustness for time delay of signal. What's more, the performance of this control strategy is better than the HVDC emergency control strategy based on the pole placement method and back stepping method.

(5) A control strategy of HVDC system for wind-thermal-bundled power system transmitted by HVDC system based on the constant power control strategy to make the transmitted power of the HVDC system follows the wind power fluctuation and to transmit the power fluctuation of the sending area with weak ability of peak

regulation and frequency modulation caused by the wind power to the receiving area with strong ability of peak regulation and frequency modulation is researched. Meanwhile, a scheme that SVC replaces the conventional reactive compensation device to reduce the action times of the conventional reactive compensation device when the transmitted power of HVDC system follows the wind power fluctuation is researched and the coordinate control strategy between the SVC and conventional reactive compensation device is researched. The simulation analysis of the control strategy is made and the simulation results show that the proposed control strategy is feasibility and effectiveness.

**Keywords:** high voltage direct current (HVDC) transmission system, AC-DC system, wind power, dynamic phasor, electromagnetic transient, hybrid simulation, emergency control, dynamic surface control, reactive power control

## 目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 课题研究目的和意义.....	3
1.3 国内外研究现状.....	5
1.3.1 高压直流系统基本控制策略简介.....	5
1.3.2 动态相量理论的提出及在 HVDC 系统建模中的应用.....	9
1.3.3 电力系统混合仿真研究.....	11
1.3.4 高压直流系统紧急功率支援控制策略研究.....	13
1.3.5 高压直流系统跟随风电功率波动控制策略研究.....	15
1.4 论文的主要工作.....	16
第 2 章 交流对称情况下的高压直流系统动态相量模型.....	19
2.1 引言.....	19
2.2 动态相量理论基础.....	20
2.2.1 实数正弦信号和传统相量.....	20
2.2.2 动态相量的概念.....	20
2.2.3 动态相量基本特性.....	21
2.2.4 电感电容元件的动态相量模型.....	23
2.3 高压直流系统动态相量模型建模与仿真方法.....	26
2.3.1 单极 12 脉动高压直流输电系统结构简介.....	26
2.3.2 6 脉动换流器的开关函数模型.....	27
2.3.3 换流器动态相量模型.....	29
2.3.4 直流线路动态相量模型.....	31
2.3.5 控制系统动态相量模型.....	31
2.3.6 动态相量模型仿真过程.....	32
2.4 仿真分析.....	34
2.4.1 仿真测试系统.....	34
2.4.2 仿真结果.....	35
2.5 本章小结.....	37

第 3 章 交流不对称情况下的高压直流系统三相动态相量模型 .....	39
3.1 引言 .....	39
3.2 三相动态相量简介 .....	39
3.3 高压直流系统三相动态相量模型建模与仿真方法 .....	40
3.3.1 换流器三相动态相量模型 .....	40
3.3.2 直流线路三相动态相量模型 .....	43
3.3.3 控制系统动态相量模型 .....	43
3.3.4 三相动态相量模型仿真过程 .....	44
3.4 仿真分析 .....	46
3.4.1 仿真测试系统 .....	46
3.4.2 仿真结果 .....	46
3.4.3 仿真误差分析 .....	49
3.5 本章小结 .....	50
第 4 章 含电力电子装置的电力系统电磁-动态相量混合仿真 .....	51
4.1 引言 .....	51
4.2 电磁暂态仿真实论 .....	52
4.2.1 电感电容元件的电磁暂态模型 .....	52
4.2.2 电磁暂态仿真的基本流程 .....	54
4.3 电磁-动态相量混合仿真方法 .....	55
4.3.1 模型区域划分及相互等效方法 .....	55
4.3.2 混合仿真流程 .....	56
4.4 仿真分析 .....	58
4.4.1 仿真测试系统 .....	58
4.4.2 仿真结果 .....	58
4.5 本章小结 .....	60
第 5 章 基于自适应动态面控制的高压直流系统广域紧急功率支援控制策略 .....	62
5.1 引言 .....	62
5.2 基于 COI 理论的两区域交直流系统模型建模 .....	62
5.2.1 COI 理论 .....	62
5.2.2 两区域交直流系统 COI 模型 .....	63
5.3 控制策略的设计和稳定性证明 .....	65
5.3.1 两区域交直流系统的状态空间方程 .....	65
5.3.2 控制策略的设计 .....	66
5.3.3 控制策略稳定性证明 .....	69

5.4 仿真分析 .....	71
5.4.1 测试系统 .....	71
5.4.2 稳定性仿真结果 .....	71
5.4.3 信号时滞的影响 .....	75
5.5 本章小结 .....	76
<b>第 6 章 高压直流系统跟随风电功率波动控制策略研究</b> .....	<b>78</b>
6.1 引言 .....	78
6.2 直流跟随风电功率波动控制策略及无功补偿装置协调控制策略 .....	78
6.2.1 基于定功率控制策略的直流跟随风电功率波动控制策略 .....	78
6.2.2 直流系统无功补偿装置协调控制策略 .....	79
6.3 仿真分析 .....	81
6.3.1 仿真测试系统 .....	81
6.3.2 仿真结果 .....	82
6.4 本章小结 .....	84
<b>第 7 章 结论</b> .....	<b>85</b>
7.1 主要结论 .....	85
7.2 研究展望 .....	86
参考文献 .....	88
攻读博士学位期间发表的论文及其它成果 .....	97
攻读博士学位期间参加的科研工作 .....	98
致 谢 .....	99
作者简介 .....	100

# Contents

<b>Abstract (In Chinese)</b> .....	I
<b>Abstract (In English)</b> .....	III
<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Research background.....	1
1.2 Research objective and significance.....	3
1.3 Review of reseach on domestic and aboar.....	5
1.3.1 Brief of HVDC system basic control strategy.....	5
1.3.2 Raise of dynamic phasor theory and its and application on modelling of HVDC system.....	9
1.3.3 Reseach on power sytem hybrid simulation.....	11
1.3.4 Research on HVDC emegency power support control strategy.....	13
1.3.5 Research on HVDC system follows the fluctuation of wind power control strategy.....	15
1.4 Mian research contents of this subject.....	16
<b>Chapter 2 HVDC system dynamic phasor model under symmetrical condition of AC system</b> .....	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Basic of dynamic phasor theory.....	20
2.2.1 Real sinusoidal signal and traditional phasor.....	20
2.2.2 Concept of dynamic phasor.....	20
2.2.3 Basic characteristic of dynamic phasor.....	21
2.2.4 Dynamic phasor model of inductance and capacitor.....	23
2.3 Modelling and simulation method of HVDC system dynamic phasor model..	26
2.3.1 Brief structure of monopole 12-pluse HVDC system.....	26
2.3.2 Switching function model of 6-pluse converter.....	27
2.3.3 Dynamic phasor model of converter.....	29
2.3.4 Dynamic phasor model of DC line.....	31
2.3.5 Dynamic phasor model of controller.....	31
2.3.6 Simulation process of dynamic phasor model.....	32
2.4 Simulation analysis.....	34
2.4.1 Simulation test system.....	34
2.4.2 Simulation results.....	35
2.5 Conclusion.....	37
<b>Chapter 3 HVDC system three-phasor dynamic phasor model under</b>	

<b>asymmetrical conditions of AC system</b> .....	39
3.1 Introduction.....	39
3.2 Brief introduction to three-phasor dynamic phasor.....	39
3.3 Modelling and simulation method of HVDC system three-phasor dynamic phasor model.....	40
3.3.1 Three-phasor dynamic phasor model of converter.....	40
3.3.2 Three-phasor dynamic phasor model of DC line.....	43
3.3.3 Dynamic phasor model of controller.....	43
3.3.4 Simulation process of three-phasor dynamic phasor model.....	44
3.4 Simulation analysis.....	46
3.4.1 Simulation test system.....	46
3.4.2 Simulation results.....	46
3.4.3 Simulation error analysis.....	49
3.5 Conclusion.....	50
<b>Chapter 4 Electromagnetic – dynamic phasor hybrid simulation of power system including power electronic device</b> .....	51
4.1 Introduction.....	51
4.2 Electromagnetic simulation theory.....	52
4.2.1 Electromagnetic simulation model of inductance and capacitor.....	52
4.2.2 Basic process of electromagnetic simulation.....	54
4.3 Electromagnetic – dynamic phasor hybrid simulation.....	55
4.3.1 Model partition and mutual equivalent method.....	55
4.3.2 Process of the hybrid simulation.....	56
4.4 Simulation analysis.....	58
4.4.1 Simulation test system.....	58
4.4.2 Simulation results.....	58
4.5 Conclusion.....	60
<b>Chapter 5 HVDC system wide area emergency power support control strategy based on adaptive dynamic surface control</b> .....	62
5.1 Introduction.....	62
5.2 Modelling of two-area AC-DC system model based on COI theory.....	62
5.2.1 COI theory.....	62
5.2.2 COI model of two-area AC-DC system.....	63
5.3 Design and stability proof of control strategy.....	65
5.3.1 State space equation of two-area AC-DC system.....	65
5.3.2 Design of control strategy.....	65
5.3.3 Stability proof of control strategy.....	69
5.4 Simulation analysis.....	71

5.4.1 Simulation test analysis.....	71
5.4.2 Stability simulation results.....	71
5.4.3 Influence of time delay.....	75
5.5 Conclusion.....	76
<b>Chapter 6 Research on HVDC system following the fluctuation of wind power control strategy.....</b>	<b>78</b>
6.1 Introduction.....	78
6.2 HVDC system follows the fluctuation of wind power control strategy and coordinated control strategy of HVDC system reactive power compensation devices.....	78
6.2.1 HVDC system follows the fluctuation of wind power control strategy based on constant power control strategy.....	78
6.2.2 Coordinated control strategy of reactive power compensation devices of HVDC system.....	79
6.3 Simulation analysis.....	81
6.3.1 Simulation test system.....	81
6.3.2 Simulation results.....	82
6.4 Conclusion.....	84
<b>Chapter 7 Conclusions and future research.....</b>	<b>85</b>
7.1 Main conclusions.....	85
7.2 Future research.....	86
<b>References.....</b>	<b>88</b>
<b>Publication and other achievements during PhD study.....</b>	<b>97</b>
<b>Research project during PhD study.....</b>	<b>98</b>
<b>Acknowledgement.....</b>	<b>99</b>
<b>Resume.....</b>	<b>100</b>

# 第1章 绪论

## 1.1 课题研究背景

随着我国社会经济的不断发展,我国电力系统取得了飞速发展。在用电负荷方面,我国电力需求不断增加,2016年我国全社会用电量5.9万亿千瓦时,其中仅东部广东、江苏、山东和浙江四省用电量2万亿千瓦时,占全社会用电量的34.35%;在此基础上,我国电力需求将继续增加,预计到2020年,我国全社会用电量6.8-7.2万亿千瓦时<sup>[1]</sup>,最大用电负荷将达到14.1亿千瓦<sup>[2]</sup>,其中70%左右的负荷将分布在中东部的16个省市,我国负荷中心将继续集中在中东部地区。在电源建设方面,截止2016年,我国发电装机容量16.4亿千瓦,预计到2020年,全国发电装机容量将达到20亿千瓦。

但是,我国能源、电力与负荷成逆向分布,煤炭、天然气等常规能源中,60%的煤炭资源集中在山西、陕西以及内蒙等西部地区;在水能、风能以及光伏等清洁能源中,2/3的水资源集中在西南地区,风能、光能等资源集中在“三北”地区。预计到2020年全国常规水电和风电装机将分别达到3.4亿千瓦和2.44亿千瓦。其中,西部常规水电装机将达到2.4亿千瓦,占常规水电总装机的70.6%，“三北”地区风电装机达到1.6亿千瓦,占风电总装机的65.6%<sup>[1]</sup>。西部为电源中心,东部为负荷中心,且西部地区网架结构较薄弱,中东部地区网架结构较强的电力分布格局明显。

为解决我国电力能源与负荷分布不均的现状,实现资源优化配置,解决西部地区风电、水电以及煤电等类型电力消纳以及中东部地区负荷用电紧张问题,减少事故和检修备用容量,提高电力系统的安全性和经济性,我国电力系统制定了“西电东送、南北互供、全国联网”的发展战略<sup>[3]</sup>。

在电网互联建设过程中,交流输电和直流输电根据其各自特点,均发挥了重要作用。交流输电因其落点灵活,可以根据电源与负荷分布、电力输送及交换等需要构成电网,以及方便扩建、覆盖范围广、能灵活适应电力市场的运营要求等特点,构成了我国电网的主干。直流输电因其在点对点、大功率、远距离送电中的优势,以及控制灵活,经济性能好,和传统直流系统需要坚强的交流电网支撑其稳定运行等特点,在电源中心到负荷中心的远距离、大容量送电中发挥了重要作用<sup>[4-5]</sup>。其中,我国已建成的直流工程有24条,具体工程及直流系统参数如表1-1所示。

表 1-1 中国已建成的 LCC-HVDC 工程  
Table 1-1 The built LCC-HVDC in China

工程	竣工年份	额定功率/MW	直流电压/kV	线路长度/km
舟山直流工程(已退出运行)	1987	100	±100	54
葛洲坝—南桥	1990	1200	±500	1045
天生桥—广州	2001	1800	±500	960
岷泗直流工程	2002	60	±50	66.2
三峡—常州	2003	3000	±500	860
三峡—广东	2004	3000	±500	960
贵州—广东	2004	3000	±500	880
宝灵背靠背直流工程	一期: 2005	360	±120	0
三峡—上海	2006	3000	±500	1048.6
贵广二回	2007	3000	±500	1194
高岭背靠背直流工程	2008	1500	±125	0
中俄黑河背靠背直流工程	2008	750	±125	0
宝鸡—德阳	2010	3000	±500	574
云南—广东	2010	5000	±800	1373
向家坝—上海	2010	7200	±800	1907
宁夏东—青岛	2010	4000	±660	1335
呼伦贝尔—辽阳	2010	3000	±500	908
格尔木—拉萨	2011	1500	±400	1030
锦屏—苏南	2012	7200	±800	2100
糯扎渡—广东	2013	6400	±800	1461
溪洛渡—广东	2013	6400	±500	2×1251
哈密—郑州	2014	8000	±800	2210
溪洛渡—金华	2014	8000	±800	1680
鲁西背靠背直流工程	2016	1000	±160	0

截止 2016 年,我国已经形成了华北-华中、华东、东北、西北和南方 5 个大区同步电网。目前,我国电网互联示意图如图 1-1 所示。5 大同步电网间,华北与华中两大区域电网通过晋东南-南阳-荆门 1000kV 特高压交流示范工程实现了同步联网;华东电网与华北-华中电网两大区域电网之间通过葛南、龙政、宜华和复奉 4 回直流线路实现了异步联网;南方电网与华北-华中电网两大区域电网之间通过三峡-广东直流线路实现异步联网;华北-华中电网与东北电网两

大区域电网之间通过高岭背靠背直流线路异步联网；华北-华中电网与西北电网两大区域电网之间通过灵宝背靠背、德宝和宁东直流线路实现了异步联网。此外，将西部北部的煤电、风电以及光伏电力通过特高压直流输电的方式输送到中东部负荷中心，西南水电通过交直流并列运行的方式输送到东部负荷中心。



图 1 - 1 我国电网互联示意图

Fig.1-1 Diagram of interconnection of power grid in China

此外，在“十三五”期间，将规划建设“五交八直”、“四交两直”、“三交一直”等第三批特高压工程，以加快满足西部北部煤电、风电、光伏能源基地和西南水电基地电力向中东部负荷中心外送的需要，提高电网安全稳定水平<sup>[1]</sup>。因此，我国电力系统将成为世界上可再生能源装机容量大、交直流并列运行特征明显、网架结构最复杂的电力系统。

## 1.2 课题研究目的和意义

作为世界上最复杂的交直流并列运行的电力系统，我国电网交直流系统互联程度高，结构复杂，为保证交直流电网的安全稳定运行，交直流系统的动态特性的分析显得十分迫切。此外，交直流并列运行虽然使我国电网结构变的十分复杂，但是在混联系统中，承担远距离、大容量输电任务的直流输电系统与交流输电系统相比，具有调节迅速、可调节容量大、经济损失小等特点，这些特点为交直流系统稳定控制、风电等具有波动性特点的新能源传输提供了新的控制运行方式。

电力系统数字仿真作为电力系统动态特性分析的基本工具之一，能为复杂电力系统的设计、运行和控制提供依据，其基本原理是根据建立的电力系统元件数学模型，通过计算和求解，以获得电力系统的动态行为和运行特性<sup>[6]</sup>。为研究交直流系统之间的动态行为，研究人员对不同详细程度的交直流系统仿真

模型以及仿真方法开展了广泛研究；目前交直流系统时域仿真中广泛使用的仿真模型可分为两类：电磁暂态模型<sup>[7,8]</sup>和机电暂态模型（或称为准稳态模型）<sup>[9]</sup>。电磁暂态模型计算精确，但是电磁暂态计算所使用的差分计算模型，计算求解占用的计算机容量大，在求解换流器等电力电子装置模型时更为明显；准稳态模型使用相量模型，计算占用的计算机容量较小，但该模型建立在交流系统三相对称的前提下，而且不能反映电力电子装置的谐波问题。

为解决电力电子装置仿真精度和求解规模的矛盾，动态相量理论被引入电力系统数字仿真中<sup>[10]</sup>，该理论对时变信号进行傅里叶变换，使用其主导分量对应的时变傅里叶系数，建立相应的反映元件动态特性的动态相量模型。建模过程中将电力电子装置处理成代数模型，而且该代数模型可以根据建模准确性的需要，选取系统中占主导地位的频率信号来反映电力电子换流器的谐波特性，在降低模型求解规模的同时能保证建模精度，为直流系统换流器等电力电子装置建模以及交直流系统的仿真提供了新思路。

在高压直流系统（High Voltage Direct Current System, HVDC System）控制方法方面，直流系统的输送功率相比交流系统，调解迅速、方便，利用直流系统这一特点，制定合理的直流系统紧急功率支援控制策略，可在大扰动情况下，提高交直流并列系统的暂态稳定性，是一种非常经济的系统紧急控制手段<sup>[11]</sup>。同时，广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）的出现，以及鲁棒控制策略的发展，为电力系统在线实时控制提供了实现的可能性<sup>[12-15]</sup>。研究利用WAMS系统提供的系统全局信息，使用鲁棒控制策略设计了一种在线、适应多种运行方式和多种故障类型的直流系统紧急功率支援控制方案，对故障后系统的安全稳定运行，提高系统的安全稳定性具有重要意义。

此外，如何利用直流系统传输功率快速可调这一特点，在网架结构薄弱、电力负荷消纳不足、调峰调频能力较弱的送端地区大规模风电，通过“风火打捆”联网经直流系统外送到网架结构坚强、调峰调频能力强的受端地区这一风电外送消纳模式中，控制直流系统跟随风电功率波动，将送端地区的风电功率波动转移到受端地区，从而为风电外送提供更好的输电选择，成为亟需研究的重点。

基于上述背景，为平衡交直流系统建模、求解复杂度和仿真精度，推动动态相量理论在直流系统以及含电力电子装置的电力系统建模仿真中的应用，本文对直流系统的动态相量模型，以及含电力电子装置的电力系统的电磁-动态相量仿真方法和交直流系统电磁-动态相量混合仿真开展研究。为充分利用直流系统调节迅速、可调节容量大、经济损失小的特点，针对两区域交直流系统大扰动后直流系统的紧急功率支援控制策略，着重针对对多种运行方式和多种故障

类型具有较好自适应性和鲁棒性的直流系统广域紧急功率支援控制策略开展研究；针对弱送端地区大规模风电经“风火打捆”联网经直流外送到强受端地区这一风电外送消纳模式，着重对直流系统跟随风电功率波动控制策略开展研究。从而为交直流系统以及含电力电子装置的电力系统的仿真建模、直流系统紧急功率支援控制以及跟随风电功率波动控制技术提供理论指导。

## 1.3 国内外研究现状

### 1.3.1 高压直流系统基本控制策略简介

#### 1.3.1.1 基本控制特性

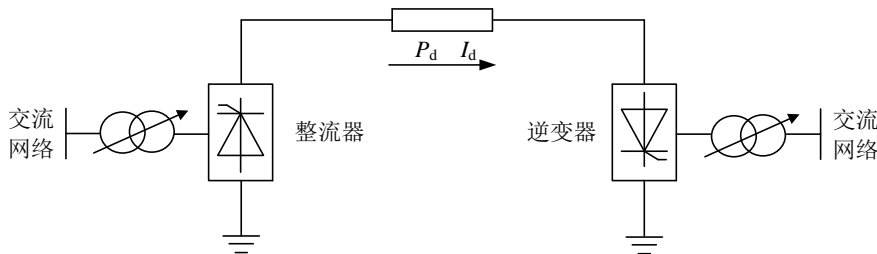


图 1-2 高压直流系统示意图

Fig.1-2 Sketch of HVDC system

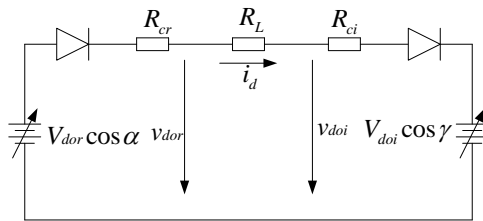


图 1-3 高压直流系统等效电路

Fig.1-3 Equivalent circuit of HVDC system

单极高压直流系统示意图如图 1-2 所示，对应的等效电路如图 1-3 所示。根据直流系统稳态模型，直流线路电流  $I_d$  可以表示为：

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (1-1)$$

其中， $V_{dor}$  和  $V_{doi}$  分别为整流器和逆变器的换流变压器阀侧的空载交流线电压有效值； $\alpha$  和  $\gamma$  分别为整流器的触发角以及逆变器的熄弧角； $R_{ci}$ 、 $R_{cr}$  以及  $R_L$  分别为整流器、逆变器的等效换相电阻和直流线路的电阻。

直流系统正常运行情况时， $R_{ci}$ 、 $R_{cr}$  以及  $R_L$  基本不变； $V_{dor}$ 、 $V_{doi}$  可通过换流变压器分接头进行控制，但其调节速度比  $\alpha$  和  $\gamma$  的调节要慢的多，在分析直流系统控制特性以及快速暂态过程中，通常认为不变。因此，直流系统的电压

和电流由换流器的  $\alpha$  和  $\gamma$  决定。一般要求直流电流和电压分别由整流器和逆变侧进行控制。

理想的整流器定电流控制的伏安特性为垂直于电流坐标轴的直线，但因为控制中增益等方面的影响，实际的整流器定电流控制的伏安特性为如图 1-4 中似垂直于电流坐标轴  $x$  轴的直线  $AB$ 。此时，直流电压根据逆变器参数表示为：

$$v_d = V_{doi} \cos \gamma + (R_L - R_{ci})I_d \quad (1-2)$$

一般等效换相电阻  $R_{ci}$  大于线路电阻  $R_L$ ，因此，当逆变侧采用定  $\gamma$  控制时，其伏安特性曲线如图 1-4 中  $CD$  段所示，为一条负斜率的直线。整流器和逆变器的伏安特性曲线的交点  $E$  为直流系统正常状态时的稳定运行点。

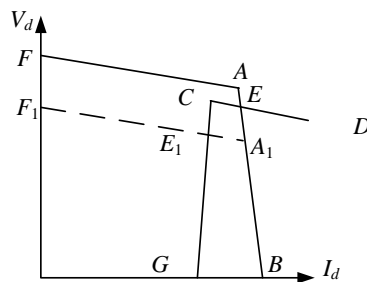


图 1-4 直流系统稳态控制特性

Fig.1-4 Steady-state control characteristic of HVDC system

根据式(1-1)可知，整流器交流母线电压下降时，直流电流将减小。为维持直流电流恒定，整流器定电流控制器将减小  $\alpha$  来增大直流电流。根据换流器的特点， $\alpha$  并不能无限制减小，为了保证换流器有足够的正向电压保证触发，一般规定  $\alpha$  的最小限值为  $5^\circ$  左右。因此，当整流侧电压持续降低，使得  $\alpha$  达到下限值时，整流器的控制方式将转换为定  $\alpha$  控制，其特性曲线如图 1-4 中  $F_1A_1$  段所示。随着整流器交流母线电压的不断下降，定  $\alpha$  控制和定  $\gamma$  控制两条特性曲线将不存在交点。因此，需在逆变器同时配置定电流控制，当定  $\alpha$  控制和定  $\gamma$  控制两条特性曲线将不存在交点时，逆变器定  $\gamma$  控制转换为定电流控制，系统的运行点将变为图 1-4 中的点  $E_1$ 。

为了避免整流侧和逆变侧的定电流控制曲线相交，两侧定电流控制的参考值设计一个差值，称为电流裕度。保证正常运行状态时，直流系统的电流参考值总是比逆变侧的定电流参考值大一个电流裕度的差值，逆变器的定电流控制在整流器定电流控制正常工作时不动作；当系统电流小于逆变器定电流参考值时，逆变器的定电流控制才动作。

当系统电压降低较大时，需要合理的控制电流值，减少直流系统的无功需求，并降低换相失败的可能性，使直流系统运行在合理的运行点，以维持系统

稳定；并在故障后系统恢复期间，限制直流电流和功率的快速增加，保证恢复期间系统的无功和电压水平，保证系统故障后顺利恢复。为实现此功能，控制系统中通常设计有低压限流控制环节（Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL）。加入 VDCOL 的直流系统稳态控制特性曲线如图 1-5 所示：

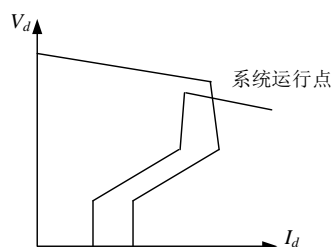


图 1-5 含低压限流控制环节的直流系统稳态控制特性

Fig.1-5 Steady-state control characteristic of HVDC system with VDCOL

### 1.3.1.2 控制系统的分层结构

直流输电控制系统分为 3 层，第 1 层为主控制级（或称为双极控制级），第 2 层为极控级，第 3 层为阀组控制级。主控制级接收调度中心发来的直流输送功率指令  $P_{set}$  以及附加控制指令  $P_{plus}$ ，通过控制运算以后，向极控级提供直流电流参考值  $i_{dref}$ 。其中，附加控制主要包括紧急功率控制、阻尼控制以及频率控制等控制；极控级通过控制运算，向各阀组控制单元提供触发角指令  $\alpha_{set}$ 。各控制级的基本功能如图 1-6 所示，具体的直流输电系统可能包含某些或全部上述功能。

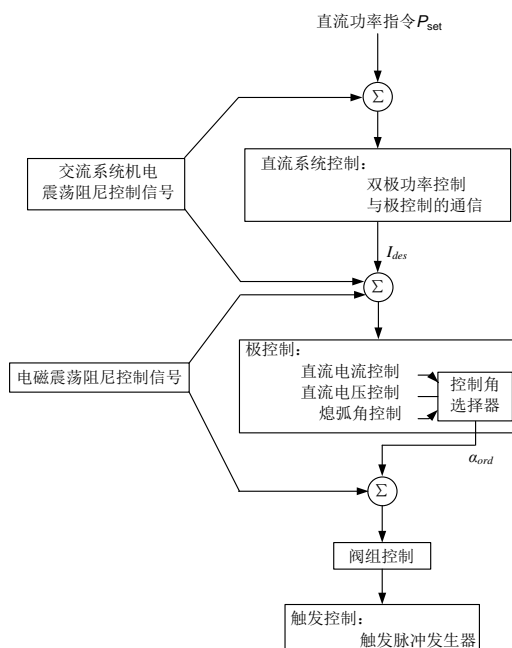


图 1-6 高压直流输电控制系统分层结构

Fig.1-6 Hierarchical Structure of the control system of HVDC

### 1.3.1.3 直流系统主控制级控制策略

直流系统主控制级的控制框图如图 1-7 所示，其一般包含 3 个模型，分别是：1、输送功率指令模块；2、附加控制模块；3、直流电流指令计算模块。其中，输送功率指令模块功能是接收调度中心发来的输送功率指令  $P_{set}$ ；附加控制模块接收直流输电系统的附加控制系统计算得到的功率调制与快速功率变化等指令  $P_{plus}$ ，与输送功率指令  $P_{set}$  叠加从而实现直流输电系统附加控制；直流电流指令值计算模块功能是根据直流传输功率和直流电压计算得到直流电流指令值  $i_{des}$ 。

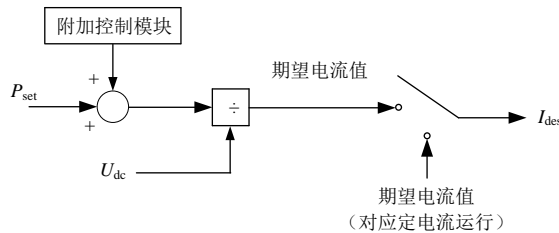


图 1-7 直流输电主控制级控制功能框图

Fig.1-7 Control diagram of main control of HVDC transmission system

#### 1) 附加控制模块

利用直流输电系统输送功率快速可调的特点，可为电力系统提供经济实用的稳定控制调节手段。直流系统附加控制的原理是根据直流输电系统送受两端的交流系统中能反映系统异常的信号(如功率变化、发电机机械角速度变化等)，计算直流输电系统的功率调节指令，使之快速吸收或补偿送受两端的交流系统中的功率变化，发挥紧急支援和阻尼震荡的效果。直流系统附加控制输出的信号  $P_{plus}$  一般与调度中心发来的输送功率指令  $P_{set}$  叠加，从而得到直流系统输送功率的参考值  $P_{order}$ 。

#### 2) 直流电流指令值计算模块

当直流输电系统是按定功率模式运行的，其主控制极的一项重要任务是根据给定的输送功率指令值计算得到直流电流的指令值。一般运行方式下，直流电流指令值等于直流系统输送功率除以直流输电系统的直流电压。直流电流指令值计算模块的控制框图如图 1-8 所示。

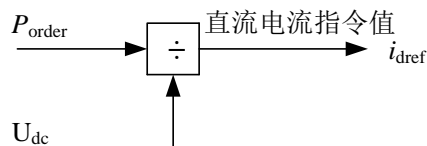


图 1-8 直流电流指令值计算模块控制框图

Fig.1-8 Control diagram of current order calculation

## 1.3.1.4 直流系统极控级控制策略

直流系统的极控级的控制框图如图 1-9 所示。

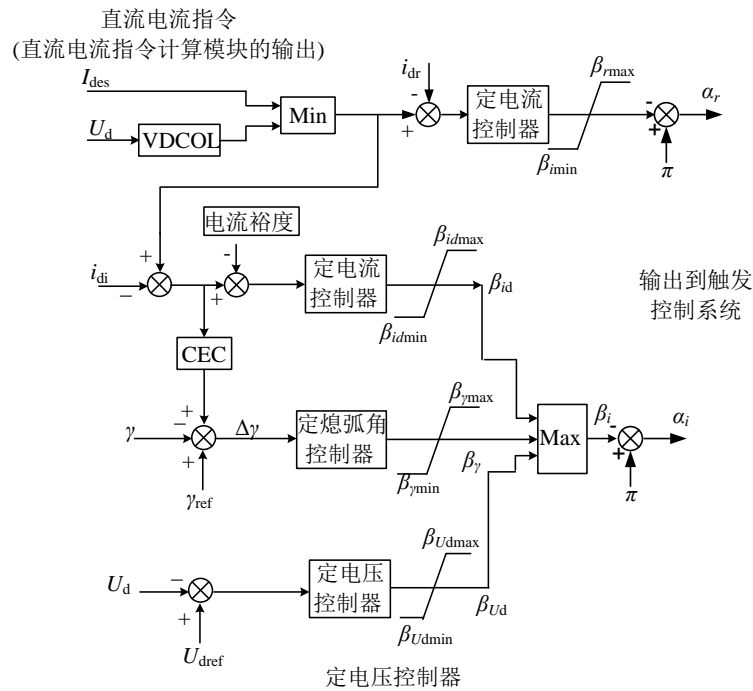


图 1-9 极控制级控制框图

Fig.1-9 Diagram of polo control

其整流侧一般配备带有  $\alpha_{min}$  限制的定电流控制器；逆变侧一般配备有定电流控制器，定电压控制器或定熄弧角控制器中的一种，或同时配备定电流控制器以及定电压控制器和定熄弧角控制器。整流侧和逆变侧的定电流控制器的电流参考值一般由于低压限流环节和直流电流指令计算模块共同决定，其中，整流侧的电流参考值比逆变侧的电流参考值高 0.1p.u. 的电流裕度。此外，逆变侧还配有电流偏差控制<sup>[5]</sup>。

## 1.3.2 动态相量理论的提出及在 HVDC 系统建模中的应用

## 1.3.2.1 动态相量理论的提出及应用

1991 年，美国加利福尼亚大学学者 Sanders S R 等首次提出动态相量的概念<sup>[10]</sup>，该理论通过对时变信号的傅里叶变换，导出其主导分量对应的时变傅里叶系数，建立相应的动态相量模型以反映元件的动态特性，并使用该理论建立了高频电力电子电路的动态相量建模，引起了国内外电力系统及电力电子相关研究人员的注意。

随后，美国东南大学教授 Stankovic A M 对动态相量理论在电力电子及电力系统的建模以及分析中的应用做了全面、深入的研究。Stankovic 教授使用动

态相量理论,建立了交流系统对称情况下 DC/DC 变换器、电力电子换流器以及有源滤波器等电力电子装置的动态相量模型<sup>[10,16,17]</sup>和交流电动机的动态相量模型<sup>[18]</sup>,建模过程中,可根据研究需要建立模型主导频率分量的动态相量模型,减小了模型复杂度和计算量;并将动态相量理论扩展到交流系统不对称情况下,分析了交流系统不对称情况下统一潮流控制器(United Power Flow Conditioner)<sup>[19]</sup>和交流电机<sup>[20]</sup>的动态相量模型,所建模型与电磁暂态模型相比均具有良好的仿真精度;此外,为扩展动态相量理论的应用领域,Stankovic 教授还将动态相量理论应用到电力系统次同步振荡<sup>[21]</sup>、电力系统小信号稳定分析<sup>[22]</sup>以及动态无功补偿器的控制器设计<sup>[23]</sup>等领域。研究表明,动态相量法为电力电子装置的建模、仿真及特性分析提供了一种建模复杂度和精度介于机电暂态建模方法和电磁暂态建模方法之间的建模、仿真工具,突破了传统电力系统的正弦准稳态假定,适应电力系统电力电子化发展的新特点。

此外,国内外其他专家学者对动态相量理论在电力电子及电力系统元件建模中的应用也做了广泛研究,建立了逆变器<sup>[24-27]</sup>、考虑谐波特性的可控串联补偿装置(Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC)<sup>[28-29]</sup>、电压源型直流输电系统<sup>[30-31]</sup>、三电平静止无功发生器<sup>[32]</sup>等电力电子装置的动态相量模型,所建模型均取得了良好的仿真效果;并建立了模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)这类复杂电力电子装置的动态相量模型<sup>[33]</sup>,并应用所建模型分析了模块化多电平换流器的运行特性,研究表明,MMC 动态相量模型与电磁暂态模型仿真精度基本一致;此外,研究人员在含逆变器的微电网动态相量建模方面也做了深入分析<sup>[36-37]</sup>;还有研究人员在动态相量理论在分布参数线路等交流系统元件建模方面做了大量研究工作<sup>[38-39]</sup>,拓展了动态相量理论的应用范围。国内外大量研究推动了动态相量理论在电力电子装置及电力系统元件的建模及分析等方面的应用。

### 1.3.2.1 动态相量理论在 HVDC 系统建模中的应用

针对动态相量理论在 HVDC 系统的建模中的应用,国内外学者也做了大量研究工作。国内外学者通过分析交流系统三相对称情况下 HVDC 系统换流器的开关状态,建立了表示换流器通断和换相运行状态的开关函数,并根据开关函数的傅立叶级数以及动态相量理论,建立了 HVDC 系统在交流系统对称状态下的动态相量模型<sup>[40-41]</sup>。研究表明,HVDC 系统动态相量模型可以按照研究需要,改变模型的复杂程度,并能在提高计算速度的同时很好地反映 HVDC 系统的主要动态特性。

为扩展 HVDC 系统动态相量模型的使用范围,研究人员通过分析交流系统

不对称故障下 HVDC 系统换流器的运行特征,建立了在交流系统不对称故障下,具有良好仿真精度,且仿真时间快于电磁暂态模型的 HVDC 系统换流器动态相量模型<sup>[42-44]</sup>。

为推动动态相量理论在 HVDC 系统的建模仿真中的应用,国内外研究人员做了大量研究工作。但是,对能充分反应 HVDC 系统换流器谐波特性,解析式清晰,适用于交流系统对称及不对称运行情况下的 HVDC 系统动态相量模型还有待深入研究。

### 1.3.3 电力系统混合仿真研究

#### 1.3.3.1 电力系统数字仿真技术

##### 1) 电力系统机电暂态仿真

随着现代电力系统的发展,以及计算机技术在电力系统中的应用,电力系统数字仿真技术取得了飞速发展。目前广泛使用的电力系统数字仿真技术有两类:电力系统机电暂态仿真和电磁暂态仿真。

电力系统机电暂态仿真主要用来分析电力系统大扰动后的暂态稳定和小扰动后的静态稳定性能;西门子公司研发的 PSS/E<sup>[45]</sup>,美国西部电力公司研发的 BPA<sup>[46]</sup>以及中国电力科学研究院研发的电力系统分析综合程序(PSASP)<sup>[47]</sup>都属于机电暂态仿真软件;其采用以电力系统工频准稳态(Quasi-steady State, QSS)为基础<sup>[48]</sup>的“相量分析法”。其中,准稳态假定电力系统的电压、电流等变量为近似基频的正弦函数,可用相量描述,据此建立系统元件的微分方程组和代数方程组。通过交替或联立求解微分方程组和代数方程组,获得系统各变量的时域解。其中微分方程组一般采用隐式梯形积分法、改进欧拉法等数值积分方法求解,代数方程组一般采用求解非线性代数方程组的牛顿法进行求解。仿真时,仿真步长为毫秒级,能仿真较长时间。

但是,随着现代电力系统的电力电子化发展,电力电子设备的快速控制、谐波特性等给电力系统造成了新的快速暂态过程。采用基波、单相以及相量模拟技术的电力系统机电暂态仿真程序,对 HVDC 系统和 FACTS 等电力电子装置使用的是准稳态模型,不能准确反映这些快速暂态过程。

##### 2) 电力系统电磁暂态仿真

电力系统电磁暂态仿真主要用来研究系统故障及操作引起的过电压、过电流,系统中的谐振暂态以及电力电子装置的快速暂态过程等系统电磁暂态过程。与机电暂态过程不同,电力系统电磁暂态过程变化快。电磁暂态程序(EMTP)<sup>[49]</sup>,加拿大曼尼托巴 HVDC 研究中心研发的 PSCAD/EMTDC<sup>[50]</sup>以及德国西门子公司研发的 NETOMAC<sup>[51-52]</sup>都属于电磁暂态仿真软件,此外, MATLAB/Power

System Blockset 也能进行电磁暂态仿真<sup>[53]</sup>。

为分析系统的暂态过程，电磁暂态仿真中，系统变量用三相瞬时值表示；系统元件模型采用详细的非线性时域模型，使用微分方程描述，系统模型阶数高；一般采用隐式梯形积分法等数值积分方法求解；仿真过程中仿真步长小，为微秒级。

模型和求解算法的复杂度以及较小的仿真步长限制了电磁暂态的规模，一般进行大系统电磁暂态仿真时，都需要对系统进行等值简化。随着 HVDC 系统和 FACTS 等电力电子装置在电力系统中的广泛应用，这些装置引起的谐波及其快速暂态过程对系统机电暂态过程的影响日益明显，而大规模系统的电磁暂态仿真不易实现。使用相互独立的电力系统电磁暂态仿真程序和机电暂态程序，仿真分析电子化日益增加的现代电力系统遇到越来越多的困难。

### 1.3.3.2 电力系统混合仿真方法

为弥补两种仿真方法的不足，研究人员提出了含电力电子装置的电力系统的机电-电磁暂态混合仿真算法<sup>[54-56]</sup>。该算法把电力系统分解为详细系统和外部系统，含电力电子装置的详细系统定义为电磁暂态子系统，采用电磁暂态仿真；传统交流电力系统的外部系统定义为机电暂态子系统，采用机电暂态仿真。机电-电磁暂态混合仿真算法可准确地模拟非线性电力电子装置的动态过程，又能提高仿真速度，扩大仿真规模。为提高机电-电磁暂态混合仿真算法的实用性和准确性，研究人员对两种模型接口位置的选择<sup>[57]</sup>，外部系统和内部系统的相互等值<sup>[58-61]</sup>以及两种模型的接口方法<sup>[62]</sup>这 3 个关键问题做了深入研究。

除传统的机电-电磁暂态混合仿真算法，研究人员也对含电力电子装置的电力系统机电-动态相量混合仿真展开了研究<sup>[63-64]</sup>，尝试为含电力电子装置的电力系统提供其他计算准确且占用计算资源较少的仿真分析方法。文献[63]和[64]分别以 HVDC 系统和静止无功补偿器作为电力电子装置研究对象，详细分析了含电力电子装置的电力系统的机电-动态相量混合仿真。其中，根据网络分解思想，对电力电子装置使用动态相量模型，外部交流系统采用机电暂态模型；并分析了机电暂态子系统和动态相量子系统之间的等值方法以及混合仿真的接口方法。研究表明，此类混合仿真方法与电磁暂态仿真相比，具有良好的仿真精度，并加快了仿真速度；与机电暂态仿真相比，具有较好的一致性。

混合仿真的目的是建立一种电力系统建模、求解复杂度和仿真精度均满足系统分析要求的仿真方法。交流系统使用电磁暂态模型，HVDC 系统等电力电子装置使用可描绘元件详细开关过程及谐波特性，且计算求解简单的动态相量模型的电磁-动态相量混合仿真为混合仿真提供了新的思路，有待深入研究。

### 1.3.4 高压直流系统紧急功率支援控制策略研究

直流系统具有输送功率快速可调的特点，并具有一定过载能力<sup>[65]</sup>，利用直流系统这些特点，可以制定合理的直流系统紧急功率支援控制策略，在交直流系统严重故障下，使用直流系统紧急功率支援提高故障后交直流混联系统的暂态稳定性，与切机、切负荷等常规安全稳定措施相比，该控制策略具有经济损失小、调节迅速等优点<sup>[66-67]</sup>。

国外直流工程建设比我国早，积累了丰富的直流系统运行经验，已成功利用直流系统紧急功率支援控制策略提高故障情况下交直流系统的稳定性。随着高压直流系统在我国的快速发展，我国已形成了交直流并列运行的电力系统网架结构，在直流系统紧急功率支援控制策略的实施方面也积累了一定工程经验<sup>[68]</sup>。根据紧急功率支援控制策略的制定方法，直流系统紧急功率支援控制策略分为离线式控制和在线式控制两类。

其中，离线式控制方法采用“离线预算，实时匹配”的方案控制直流紧急功率支援控制的实施，通过对系统每个合理的运行工况和故障的组合在离线环境下大量的离线计算，预先制定系统失稳后的控制措施，进而制定好电力系统安全稳定控制策略表，然后存放以运行工况和故障为索引的电力系统安全稳定控制决策表中。当系统在线运行时，根据实际的工作点以及故障近似匹配。为推动直流系统紧急功率支援控制的发展，研究人员对离线式紧急功率支援进行了大量研究。文献[66]研究了华中电网多回直流系统的紧急功率支援改善交直流系统稳定性的能力，多回直流系统之间的紧急功率转移能有效提高送受端电力系统的暂态稳定性，并能减少送端系统切机容量，较好的保证原有的输电计划，经济效益显著。文献[67]以2010年南方电网为研究对象，分析制定了罗平-百色500kV交流线路单回三相永久短路故障等系统故障下，可提高系统暂态稳定性的云广特高压直流紧急功率支援控制策略。文献[69]仿真分析了南方电网贵广、天广和三广3条直流输电线路紧急功率支援控制对故障后电力系统稳定性的影响，研究表明，若要充分发挥多直流改善系统稳定性的能力，需制定合理的多回直流紧急功率支援协调控制策略。文献[70]研究了四川-西北电网2010年丰大运行方式下，利用德宝直流提高四川电网交流线路短路等故障下电网稳定性的紧急功率支援控制策略。文献[71]制定了针对华中电网到华北电网1000kV特高压交流联络线故障后直流系统的紧急功率支援控制策略，仿真表明，制定的控制策略可有效提高系统的功角稳定性。

在线式控制方法一般根据广域测量系统（Wide Area Measurement System, WAMS）采集的故障后系统状态的实时信息，采用线性控制方法、智能控制方

法、时间最优控制以及鲁棒控制方法等先进控制理论，制定直流紧急功率支援控制策略。加拿大电力系统专家 Kunder 利用零极点配置这种线性控制方法，以两区域交直流混联系统为研究对象，设计了可提高两区域交直流系统稳定性的直流系统紧急功率支援控制策略<sup>[72]</sup>。

由傅京孙教授提出的智能控制<sup>[73]</sup>，作为一类无需人直接干预，既能驱动系统自动实现控制目标的自动控制方法，发展出小波神经网络、多代理控制等多个分支，也成功的应用到直流系统紧急功率支援控制策略的制定中。文献[74]和[75]使用小波神经网络，结合 WAMS 测量数据，针对云广特高压直流系统，设计了可在线预测直流功率支援量的直流系统紧急功率支援控制策略，推动了智能控制在直流系统紧急功率支援控制领域的应用。文献[76]使用多代理专家技术，制定了能同时保证系统首摆稳定性，系统首摆后续过程阻尼水平以及换流母线电压水平三个目标的直流系统综合协调紧急控制策略，仿真分析表明，该控制策略能提高系统稳定性，改善了故障后直流系统的控制效果，并对信号延迟有良好的鲁棒性，为同时解决系统功角稳定性和电压稳定性提供了新思路。此外，时间最优控制作为一种使系统从给定的初始状态到最终稳定状态所用时间最短的控制方法<sup>[77]</sup>，也在直流系统紧急功率支援控制策略的制定中取得了良好的效果。文献[78]和[79]基于该控制制定了快速恢复 2 区域交直流系统稳定性的直流系统紧急功率支援控制策略，研究表明，该控制策略能最大限度的改善系统的首摆稳定性，并使故障后系统尽快恢复稳定。

除此之外，研究人员也对使用反馈线性化方法、反步法、滑模变结构控制方法等鲁棒控制理论制定直流系统紧急功率支援控制策略做了大量研究工作，使直流系统鲁棒控制策略成为在线式直流系统紧急功率支援控制策略的重要分支。

文献[80]基于反馈线性化方法，通过引入状态反馈量消去交直流系统的非线性，制定了直流系统鲁棒控制策略，在系统大打扰后明显提高了系统的暂态稳定性，取得了良好的控制效果。文献[81]采用 WAMS 系统测量的全局信号，使用反步法设计了对模型建模误差、系统扰动和平衡点变化具有较强鲁棒性的直流系统鲁棒控制策略，也取得了良好的控制效果。文献[82]根据 COI 坐标下两区域交直流系统状态空间方程，使用滑模变结构控制方法设计了能处理直流系统建模中的等效响应时间参数误差以及外界干扰等误差的直流系统紧急功率支援控制器。

此外，研究人员对使用  $H_\infty$ 理论<sup>[83]</sup>、反步滑模法<sup>[84]</sup>等鲁棒控制方法设计直流系统紧急功率支援控制策略开展了大量研究，均取得了良好的控制效果，推动了鲁棒控制理论在制定直流系统紧急功率支援控制策略中的应用。同时，随

随着鲁棒控制理论的发展,动态面控制策略等鲁棒性、控制效果好的鲁棒控制方法的出现<sup>[85-88]</sup>,为直流系统紧急功率支援控制策略的制定提供了更多工具以及研究方向,值得关注。

除上述研究外,国内研究人员对直流系统紧急功率支援提升量的限制因素做了研究,研究表明逆变站交流系统电压支撑能力是影响直流功率紧急提升的关键因素<sup>[89-90]</sup>;并且,文献[89]基于其研究结果,制定了幅值自适应的直流系统紧急功率支援控制策略。

### 1.3.5 高压直流系统跟随风电功率波动控制策略研究

与水电、火电机组相比,风电机组出力频繁波动,当波动较强的大规模风电并入网架结构较薄弱,调峰调频能力较差,电力负荷需求水平较低的电网时,将会影响电网的电能质量,改变系统暂态稳定性<sup>[91-94]</sup>。为了保证该类风电接入系统中风电的消纳以及系统的安全、稳定和经济运行,“风火打捆”联网经直流外送成为该类系统风电外送的主要方式<sup>[95]</sup>。利用直流系统传输功率快速可控的特点,可为风电外送提供新的控制策略,将风电波动对弱送端地区的影响转移给网架结构强、调峰调频能力强的受端系统。

目前,国内外研究人员对风电并网外送的方式及控制策略的研究主要集中在通过柔性直流系统并网外送的策略以及使用电网换相的传统直流外送两个方面。其中,通过柔性直流系统并网外送的策略取得了大量研究成果。针对大规模风电使用两端柔性直流系统输送的方式,文献[96]根据柔性直流系统的欧拉-拉格朗日模型设计了一种柔性直流无源解耦控制策略,研究表明,该控制策略在稳态以及风电扰动下均有很好的响应特性;文献[97]建立了柔性直流系统换流器的端口受控哈密顿模型,并设计了一种外环使用自抗扰控制器来设定内环参考电流,内环使用受控哈密顿模型无源控制器跟踪参考电流的柔性直流系统换流器双闭环控制策略,研究表明,该控制策略能实现风电场的有效并网,并具有良好的抗干扰能力。针对大规模风电使用多端柔性直流系统进行并网方面,文献[98]将风电场等效为一个无源网络,根据柔性直流对无源网络设计的控制方法设计了风电网并入柔性直流的控制策略,仿真表明,该控制策略在风电扰动及系统故障时均取得良好的控制效果。

针对风电经传统直流系统外送控制策略方面,研究人员主要针对风电孤岛经传统直流系统外送以及“风火打捆”联网经传统直流系统外送两方面开展了大量研究。在风电孤岛经传统直流系统外送方面,文献[99]分析了大规模双馈型风力发电机群通过该类结构并网外送情况下,保证风电功率波动时,直流系统整流侧换流母线电压水平在允许范围内的风电机组与直流系统无功协调控制策

略；文献[100]提出了一种风电和远距离火电分别通过不同的整流器集中并网的三端传统直流系统外送风电和火电的拓扑结构以及其平抑风电波动的控制策略，研究表明该拓扑和控制策略能有效平抑风电的波动。在“风火打捆”联网经传统直流系统外送方面，文献[101]分析了使用送端系统的电力盈余和调峰盈余，结合风电功率的预测结果，制定直流输电功率调整曲线，实现直流系统输送功率多段式平稳和风电大规模送出；文献[102]提出了一种直流系统变功率定无功功率运行的直流系统主控制级控制策略，当风电功率波动时，通过所提控制策略使直流输送的有功功率跟随风电功率波动，同时保证该过程中换流器消耗的无功功率不变，以限制直流系统无功补偿装置的动作；文献[103]在文献[102]的基础上，为提高直流系统换流器的运行效率，提出了一种变功率限制功率因数的直流系统主控制级控制策略，当直流系统传输功率变化时，通过限制直流系统换流器功率因数的范围，限制换流器消耗的无功功率变化范围，并提出了该控制策略下减少常规无功补偿装置动作次数的控制方法。

但在“风火打捆”联网经直流系统外送过程中，在不改变传统直流的基本控制策略的前提下，使传统直流系统跟随风电波动的直流系统控制方法，以及避免该过程中换流站内常规无功补偿装置频繁投切的控制方案值得关注。

## 1.4 论文的主要工作

本文在国家电网公司科技项目“特高压直流接入 750kV/1000kV 交流系统关键技术方案研究”项目资助下，在高压直流系统建模仿真方面，着重针对高压直流系统的动态相量建模、含电力电子装置的电力系统的电磁-动态相量混合仿真以及交直流系统电磁-动态相量混合仿真开展研究；在直流系统控制策略方法，着重针对基于自适应动态面控制策略的高压直流系统紧急功率支援控制策略、高压直流系统跟随风电功率波动控制策略开展研究。研究成果试图为交直流系统数字仿真和直流系统控制提供理论和方法支撑。具体研究内容包括：

### 1) 计及直流系统换流器交流侧谐波特性的直流系统动态相量模型

建立了交流系统三相对称时，能反应直流系统换流器交流侧谐波特性的，包含直流系统换流器、直流线路以及控制器模型的直流系统动态相量模型，并分析了模型的仿真过程，仿真分析验证了所提模型和仿真方法的有效性表明。该部分根据直流系统换流器谐波特性分析，以及动态相量理论，建立了交流系统三相对称情况下，表达式清晰，能反应直流系统换流器交流侧谐波特性的直流系统动态相量模型，并分析了该动态相量模型的仿真过程。使用 MATLAB 语言编程实现了所提直流系统动态相量模型，并与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态模型进行了仿真对比；仿真分析表明，该模型能反映直流系统在直流系统扰动和

交流系统扰动下的动态特性，尤其能反应直流系统换流器与交流系统之间的谐波动态特性。

### 2) 适宜于不对称故障的高压直流系统三相动态相量模型

建立了交流系统三相不对称情况下，能反应直流系统动态特性的，包含直流系统换流器、直流线路以及控制器模型的直流系统三相动态相量模型，并分析了模型的仿真过程，仿真分析验证了所提模型和仿真方法的有效性表明。该部分根据直流系统换流器谐波特分析以及三相动态相量理论，建立了适用于交流系统三相不对称情况的，包含直流系统换流器、直流线路以及控制器模型的直流系统动态相量模型，使用 MATLAB 语言编程了实现所提直流系统三相动态相量模型；并与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态模型进行了仿真对比；仿真分析表明，所提直流系统三相动态相量模型能有效反应交流系统不对称故障时直流系统的动态特性，仿真精度能满足仿真需要。

### 3) 含电力电子装置的电力系统电磁-动态相量混合仿真

提出了含电力电子装置的电力系统中，交流系统使用电磁暂态模型，电力电子装置使用动态相量模型的电磁-动态相量混合仿真方法，分析了混合仿真中模型区域划分时接口母线位置、模型相互等效方法，并以交直流系统为例，分析了交直流系统电磁-动态相量混合仿真的实现方法，仿真分析验证了所提混合仿真方法的有效性。仿真验证中，使用 MATLAB 语言编程实现交直流系统电磁-动态相量混合仿真，并与 PSCAD/EMTDC 电磁暂态模型进行了仿真对比；仿真分析表明，所提出的混合仿真能在交流系统使用电磁暂态模型，直流系统使用比电磁暂态模型简单易求解的动态相量模型，以及较大仿真步长情况下，在不同的交直流系统扰动下，有效反映交直流系统的动态过程，具有良好的仿真精度。

### 4) 基于自适应动态面控制策略的高压直流紧急功率支援控制策略

使用 COI 理论的两区域交直流系统等效建模方法，基于自适应动态面控制策略，设计了能处理系统固有的未知建模参数和外界干扰，对系统不同运行点和不同故障以及信号时滞等具有较强自适应性和鲁棒性强的两区域交直流系统中 HVDC 系统紧急功率支援控制策略。该部分首先分析了基于 COI 理论的两区域交直流系统等效建模方法，明确高压直流系统紧急功率支援控制策略的控制目标；基于自适应动态面控制策略，设计了两区域交直流系统中 HVDC 系统紧急功率支援控制策略；使用 PSCAD/EMTDC 上建立的两区域交直流系统仿真模型，进行了仿真对比分析；仿真分析表明，所提控制策略对不同故障、系统不同运行点以及不同的信号时滞均有很好的自适应性和鲁棒性，其控制效果优于基于零极点配置和基于反步法设计的高压直流系统紧急功率支援控制策略。

### 5) 高压直流系统跟随风电功率波动控制技术

研究了风力资源集中, 但网架结构较薄弱, 负荷消纳能力有限的送端地区的大规模风电通过“风火打捆”联网经传统直流系统外送到网架结构较坚强的负荷中心这一风电外送消纳模式中, 基于定功率控制策略的 HVDC 系统输送功率跟随风电功率波动的控制策略, 并分析了 HVDC 系统输送功率跟随风电功率波动时, 使用晶闸管投切电容器型静止无功补偿装置 (Thyristor Switched Capacitor, TSC 型 SVC) 替代常规无功补偿装置的方案以及相互协调控制策略控制策略, 以减少其配置常规无功补偿装置动作次数; 以西北地区某“风火打捆”联网经直流系统外送工程为例, 仿真验证了所提控制策略的有效性。

论文的章节安排如下:

第 1 章阐述了本课题的背景和意义, 介绍了高压直流系统的基本控制策略、附加控制策略和无功补偿装置投切控制策略, 以及高压直流系统的动态相量建模、电力系统混合仿真、高压直流系统紧急功率支援控制策略以及跟随风电功率波动控制策略的研究发展现状, 以及本文的主要工作。

第 2 章以动态相量建模理论为基础, 对交流系统三相对称情况下反映高压直流系统换流器谐波特性的高压直流系统动态相量模型及其仿真过程开展研究。

第 3 章在第 2 章的基础上, 为扩展高压直流系统动态相量模型的应用范围, 根据三相动态相量理论, 对交流系统不对称状态下的高压直流系统三相动态相量模型及其仿真过程开展研究。

第 4 章在前两章的基础上, 对含电力电子装置的电力系统中电力电子装置使用动态相量模型, 交流系统使用电磁暂态模型的电磁-动态相量混合仿真方法开展研究, 并以交直流系统电磁-动态相量混合仿真方法为例详细分析了电磁-动态相量混合仿真的实现方法。

第 5 章利用直流系统传输功率的快速可调性, 着重研究改善交直流系统暂态稳定性的, 对系统多种运行方式和多种故障类型具有自适应性和鲁棒性的, 基于动态面控制策略和自适应控制理论的直流系统广域紧急功率支援控制策略。

第 6 章利用直流系统传输功率的快速可调性, 着重研究弱送端地区风电以“风火打捆”联网经直流系统外送到强受端地区过程中, 适应风电功率波动的直流系统控制策略, 以及在此过程中减少高压直流系统无功补偿装置动作次数的 SVC 替代方案及协调控制策略。

第 7 章对本文的工作进行了总结, 同时对下一步的工作进行了展望。

## 第2章 交流对称情况下的高压直流系统动态相量模型

### 2.1 引言

高压直流系统因在远距离、大容量输电中具有较好的经济和技术优势，在我国电源中心到负荷中心送电过程中发挥了重要作用。南方电网范围内，目前有 9 回直流输电线路同时运行。其中，溪洛渡-广东直流线路为同塔双回直流输电线路，此外，7 条直流同时落点于广东电网，交直流系统相互作用问题明显。国家电网范围内，交直流系统相互作用问题同样突出。

为保证电网的安全稳定运行，必须详细分析交直流系统间的动态特性。电力系统数字仿真作为广泛使用的电力系统分析工具之一，为交直流系统动态特性分析提供了有利的工具。目前，使用广泛的交直流系统数字仿真方法有机电暂态仿真方法和电磁暂态仿真方法两类。在机电暂态仿真中，交流系统元件使用基波频率下的正序相量模型建模，直流系统元件使用准稳态模型，不能有效反映交直流系统间的谐波相互作用和交流系统不对称下交直流系统的动态过程<sup>[104-105]</sup>。电磁暂态仿真根据能描述交直流系统和全系统暂态过程的微分方程，使用隐式梯形积分法等数值积分方法对系统方程进行求解，能反应全系统所有频率分量的动态特性以及直流系统的动态过程<sup>[106]</sup>，但电磁暂态仿真模型及求解算法复杂，容易受到系统复杂性以及计算规模和时间限制<sup>[40]</sup>。

为解决直流系统在机电暂态仿真和电磁暂态仿真中遇到的问题，建模复杂度和精度介于机电暂态模型和电磁暂态模型之间的动态相量法被引入到直流系统建模中<sup>[40-41]</sup>。文献[40]和[41]建立了交流系统对称情况下直流系统的动态相量模型，但均未考虑交直流系统间的谐波作用。

为完善直流系统动态相量模型，本章建立了能反映交直流系统间各频率分量间动态特性的直流系统动态相量模型。本章首先阐述分析了能反映直流系统换流器开关以及换相过程的换流器开关函数；然后使用动态相量理论建立了反映直流系统换流器谐波特性的 12 脉动直流输电系统的动态相量模型，该模型包括换流器、直流线路以及控制器的动态相量模型，分析了该模型的仿真过程。在 MATLAB 中编程实现了提出的高压直流系统动态相量模型，将所提模型得到的仿真结果与文献[41]所提模型得到的仿真结果，以及 PSCAD/EMTDC 中的电磁暂态仿真模型得到的仿真结果进行了对比分析，验证了所提模型及仿真方法的有

效性。

## 2.2 动态相量理论基础

### 2.2.1 实数正弦信号和传统相量

介绍动态相量前，先介绍传统相量的定义。如式(2-1)所示的正弦实数信号：

$$x(t) = X \cos(\omega t + \delta) \quad (2-1)$$

当其频率不变时，则该信号对应的相量为：

$$\dot{X} = X e^{j\delta} = X \angle \delta \quad (2-2)$$

因此，相量是正弦实数信号的频域表示。此外，正弦实数信号可由其相量根据式(2-3)得到：

$$x(t) = \text{Re}(\dot{X} e^{j\omega t}) \quad (2-3)$$

电力系统稳态时，系统中的电压、电流等变量均为工频的正弦信号，将系统中的这些变量用相量来表示，可以合理的省略瞬时变量中的工频旋转分量  $e^{j\omega t}$ ，只保留变量的幅值和相位，从而简化运算。

### 2.2.2 动态相量的概念

当信号为非正弦信号时，则对该信号某一瞬时值，可以利用傅立叶变换分解成一系列频率不同、幅值不同、相位不同的信号的叠加，这种变换是针对某一瞬时值来进行的。

动态相量是针对一个非正弦的时间变量，基于时变的傅立叶分解提出的。下面，给出动态相量数学上的定义<sup>[40]</sup>。

对于时域上表示为  $x(\tau)$  的波形，在任一区间  $\tau \in (t-T, t]$  中，都可以用时变傅立叶级数表示为：

$$x(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k(t) e^{jk\omega_s \tau} \quad (2-4)$$

其中， $\omega_s = 2\pi/T$ ， $X_k(t)$  为第  $k$  阶时变傅立叶系数，是时间的函数。根据傅立叶分解，第  $k$  阶系数可以写成下式的形式：

$$X_k(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega_s \tau} d\tau = \langle x \rangle_k(t) \quad (2-5)$$

定义  $\langle x \rangle_k(t)$  为第  $k$  阶动态相量，是信号  $x(\tau)$  在时间轴上的“滑动窗”内分解得到的傅立叶级数，如图 2-1 所示。动态相量法就是选取信号  $x(\tau)$  在宽度为  $T_0$  的时

间窗内的傅立叶系数建立其动态模型。相量  $\langle x \rangle_k(t)$  随宽度为  $T_0$  的“滑动窗”在  $x(\tau)$  的时间轴上移动而改变，因此被称为动态相量，也称为时变的相量。

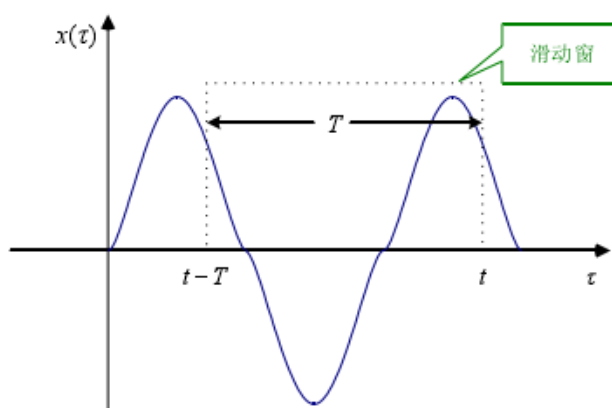


图 2-1  $x(\tau)$  的时变傅立叶分解

Fig. 2-1 Time-varying fourier expansion of  $x(\tau)$

根据动态相量的定义可知，动态相量可以分别从时域和频域两个角度解释。从时域角度，当“滑动窗”选定后，将原始时域信号在“滑动窗”内进行傅立叶展开，各阶时变的傅立叶级数即为各阶动态相量，可利用各阶动态相量还原出原始信号；从频域角度，原始信号中包含不同频率成分时，动态相量理论可将原始信号分解成基频信号和高次谐波信号组合的形式，各次动态相量分别为各次频率信号的复数包络。

### 2.2.3 动态相量基本特性

根据动态相量的概念，可以推导出以下动态相量的 5 个主要特性，这些特性是动态相量理论建模仿真的基础。

#### 2.2.3.1 加减特性

若基频频率相同的时域信号  $x(t)$ 、 $y(t)$  和  $z(t)$  满足

$$z(t) = x(t) + y(t) \quad (2-6)$$

则根据动态相量的定义，其对应的  $k$  阶动态相量满足：

$$\langle z(t) \rangle_k = \langle x(t) \rangle_k + \langle y(t) \rangle_k \quad (2-7)$$

#### 2.2.3.2 乘积特性

对于两个时域信号  $x(t)$  和  $y(t)$ ，满足

$$y(t) = a \cdot x(t) \quad (2-8)$$

其中， $a$  为实数，则其动态相量满足：

$$\langle y(t) \rangle_k = a \langle x(t) \rangle_k \quad (2-9)$$

两个时域信号  $x(t)$  和  $y(t)$  乘积的动态相量，满足：

$$\langle xp \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle p \rangle_i \quad (2-10)$$

即两个信号在时域的乘积的动态相量对应动态相量的卷积，证明如下：

设时域信号  $z$  的  $k$  阶动态相量为：

$$\langle z \rangle_k = \sum_i \langle x \rangle_{k-i} \langle p \rangle_i \quad (2-11)$$

根据式(2-4)，信号  $z$  的时域表达式为：

$$\begin{aligned} z(\tau) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle z \rangle_k e^{jk\omega\tau} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_{k-i} \langle q \rangle_i e^{jk\omega\tau} \\ &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_{k-i} \langle q \rangle_i e^{j(k-i)\omega\tau} e^{ji\omega\tau} \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left[ \langle q \rangle_i e^{ji\omega\tau} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_{k-i} e^{j(k-i)\omega\tau} \right] \\ &= \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left[ \langle q \rangle_i e^{ji\omega\tau} x(\tau) \right] = q(\tau) \cdot x(\tau) \end{aligned} \quad (2-12)$$

因此，式(2-11)成立。

### 2.2.3.3 微分特性

时域信号  $x(t)$  的第  $k$  阶动态相量，它的微分形式满足：

$$\left\langle \frac{dx(t)}{dt} \right\rangle_k = \frac{d \langle x \rangle_k(t)}{dt} + jk\omega \langle x \rangle_k(t) \quad (2-13)$$

利用分步积分以及动态相量定义，可以给出对式(2-13)的证明，证明如下：

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{dx(t)}{dt} \right\rangle_k &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \frac{dx(\tau)}{dt} e^{-jk\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \frac{d}{dt} (x(\tau) e^{-jk\omega\tau}) d\tau + j\omega \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{d}{dt} \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\omega\tau} d\tau + jk\omega \langle x \rangle_k(t) \\ &= \frac{d \langle x \rangle_k(t)}{dt} + jk\omega \langle x \rangle_k(t) \end{aligned} \quad (2-14)$$

与传统信号的分微分形状相比，式(2-14)右式第一项没有被忽略；这也体现了动态相量与传统相量的区别，动态相量保留了信号的一部分动态特性。

### 2.2.3.4 共轭特性

动态相量与传统相量相同，也是复数，也有共轭特性。动态相量  $\langle x \rangle_1$  有如下

特性:

$$\langle x \rangle_1 = \langle x \rangle_1^R + j \langle x \rangle_1^I = \langle x \rangle_{-1}^* = (\langle x \rangle_{-1}^R + j \langle x \rangle_{-1}^I)^* \quad (2-15)$$

其中, 上标  $R$  和  $I$  分别表示相量的实部和虚部, “\*”表示共轭复数。

### 2.2.3.5 动态相量值与时域值的相互转换

#### 1) 时域值到动态相量值的转换

根据动态相量定义, 可以得到数值积分形式下时域信号  $x(\tau)$  到第  $k$  阶动态相量  $\langle x \rangle_k(t)$  的转换关系, 当积分步长为  $\Delta t$  时, 该转换关系为:

$$\begin{aligned} \langle X \rangle_k(t) &= \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-jk\left(\frac{2\pi}{T}\right)\tau} d\tau \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t-T+n\Delta t) e^{-jk\frac{2\pi}{T}(t-T+n\Delta t)} \end{aligned} \quad (2-16)$$

其中,  $N=T/\Delta t$ 。

#### 2) 动态相量值到时域值的转换

根据动态相量定义以及动态相量的共轭特性, 可以得到动态相量值到时域值的转换关系为:

$$x(t) = \langle X \rangle_0(t) + 2\text{Re} \sum_{k=1}^{\infty} \langle X \rangle_k(t) e^{jk\omega_s t} \quad (2-17)$$

## 2.2.4 电感电容元件的动态相量模型

### 2.2.4.1 隐式梯形积分法

分析电感电容元件的动态相量模型前, 首先介绍解常微分方程的常用数值积分方法-隐式梯形积分法<sup>[106-107]</sup>。

对于一阶常微分方程式:

$$\frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), t] \quad (2-18)$$

假设  $x(t_0) = x_0$  已给定, 积分步长为  $\Delta t$ , 求满足式(2-18)的解  $x(t_0 + \Delta t)$ , 可将式(2-18)改写成使用数值积分法表示的计算形式:

$$x(t_0 + \Delta t) = x(t_0) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} f[x(t), t] dt \quad (2-19)$$

进一步使用隐式梯形积分法, 使用  $x(t)$  在  $t_0$  处的切线斜率  $f[x(t_0), t_0]$  和在  $t_0 + \Delta t$  处的切线斜率  $f[x(t_0 + \Delta t), t_0 + \Delta t]$  的平均值求取式(2-19)中的积分项的值, 则式(2-19)可表示为:

$$x(t_0 + \Delta t) = x(t_0) + \frac{\Delta t}{2} \{f[x(t_0 + \Delta t), t_0 + \Delta t] + f[x(t_0), t_0]\} \quad (2-20)$$

隐式梯形积分法具有下列优点<sup>[108]</sup>:

- 1) 仿真精度高, 局部截断误差为  $o(h^3)$ ;
- 2) 使用隐式梯形积分法求解微分方程时, 数值解稳定;
- 3) 隐式梯形积分法适合求解刚性系统。

#### 2.2.4.2 电感电阻元件的动态相量模型

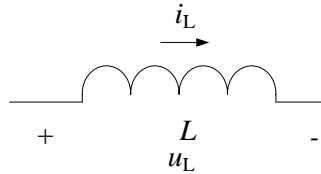


图 2-2 电感支路

Fig. 2-2 The circuit of inductance

图 2-2 所示的电感支路的时域微分动态方程为:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (2-21)$$

根据动态相量理论, 其动态相量微分动态方程为:

$$\langle u_L \rangle_k = L \frac{d\langle i_L \rangle_k}{dt} + jk\omega L \langle i_L \rangle_k \quad (2-22)$$

设积分步长为  $\Delta t$ , 应用隐式梯形积分公式, 将式(2-22)转化为差分方程得:

$$\begin{aligned} \langle i_L \rangle_k(t + \Delta t) - \langle i_L \rangle_k(t) &= \frac{\Delta t}{2L} [\langle u_L \rangle_k(t + \Delta t) - jk\omega L \langle i_L \rangle_k(t + \Delta t)] \\ &+ \frac{\Delta t}{2L} [\langle u_L \rangle_k(t) - jk\omega L \langle i_L \rangle_k(t)] \end{aligned} \quad (2-23)$$

对式(2-23)化简可得:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\Delta t}{2L} jk\omega L\right) \langle i_L \rangle_k(t + \Delta t) &= \frac{\Delta t}{2L} \langle u_L \rangle_k(t + \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} \langle u_L \rangle_k(t) \\ &+ \left(1 - \frac{\Delta t}{2L} jk\omega L\right) \langle i_L \rangle_k(t) \end{aligned} \quad (2-24)$$

根据式(2-24), 可得到电感元件在动态相量域上的电压电流友模方程为:

$$\begin{aligned} \langle i_L \rangle_k(t + \Delta t) &= \frac{1}{R_L} \langle u_L \rangle_k(t + \Delta t) + I_L(t) \\ I_L(t) &= A_L \langle i_L \rangle_k(t) + B_L \langle u_L \rangle_k(t) \end{aligned} \quad (2-25)$$

其中,

$$R_L = (1 + jk\omega L \frac{\Delta t}{2L}) / \frac{\Delta t}{2L}$$

$$A_L = (1 - jk\omega L \frac{\Delta t}{2L}) / (1 + jk\omega L \frac{\Delta t}{2L})$$

$$B_L = \frac{1}{R_L} = \frac{\Delta t}{2L} / (1 + jk\omega L \frac{\Delta t}{2L})$$

对应的动态相量暂态等值计算电路如图 2-3 所示。

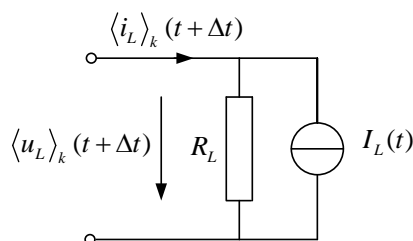


图 2-3 电感元件动态相量暂态等值计算电路  
Fig. 2-3 Dynamic phasors transient equivalent circuit of inductance

### 2.2.4.3 电容元件的动态相量模型

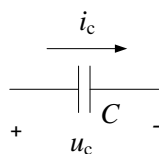


图 2-4 电容支路  
Fig. 2-4 The circuit of capacitor

图 2-4 所示的电容支路的时域微分动态方程为：

$$C \frac{du_c}{dt} = i_c \tag{2-26}$$

根据动态相量理论，其动态相量微分动态方程为：

$$C \frac{d\langle u_c \rangle_k}{dt} = \langle i_c \rangle_k - jk\omega C \langle u_c \rangle_k \tag{2-27}$$

设积分步长为  $\Delta t$ ，应用隐式梯形积分公式，将式(2-27)转化为差分方程得：

$$\begin{aligned} \langle u_c \rangle_k(t + \Delta t) - \langle u_c \rangle_k(t) &= \frac{\Delta t}{2C} [\langle i_c \rangle_k(t + \Delta t) - jk\omega C \langle u_c \rangle_k(t + \Delta t)] \\ &\quad + \frac{\Delta t}{2C} [\langle i_c \rangle_k(t) - jk\omega C \langle u_c \rangle_k(t)] \end{aligned} \tag{2-28}$$

合并同类项后得：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta t}{2C} \langle i_c \rangle_k(t + \Delta t) &= (1 + j\omega C \frac{\Delta t}{2C}) \langle u_c \rangle_k(t + \Delta t) \\ &\quad + (-1 + j\omega C \frac{\Delta t}{2C}) \langle u_c \rangle_k(t) - \frac{\Delta t}{2C} \langle i_c \rangle_k(t) \end{aligned} \tag{2-39}$$

根据式(2-29)，可得到电容元件在动态相量域上的电压电流友模方程为：

$$\begin{aligned} \langle i_c \rangle_k(t + \Delta t) &= \frac{1}{R_c} \langle u_c \rangle_k(t + \Delta t) + I_c(t) \\ I_c(t) &= A_c \langle u_c \rangle_k(t) - \langle i_c \rangle_k(t) \end{aligned} \quad (2-30)$$

其中，

$$\begin{aligned} R_c &= 1 / \left( \frac{2C}{\Delta t} + jk\omega C \right) \\ A_c &= jk\omega C - \frac{2C}{\Delta t} \end{aligned}$$

对应的动态相量暂态等值计算电路如图 2-5 所示。

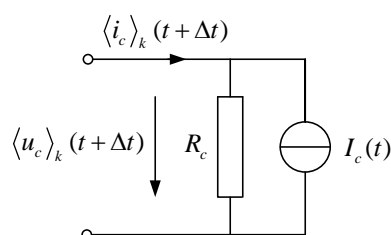


图 2-5 电容元件动态相量暂态等值计算电路

Fig. 2-5 Dynamic phasors transient equivalent circuit of capacitor

## 2.3 高压直流系统动态相量模型建模与仿真方法

### 2.3.1 单极 12 脉动高压直流系统结构简介

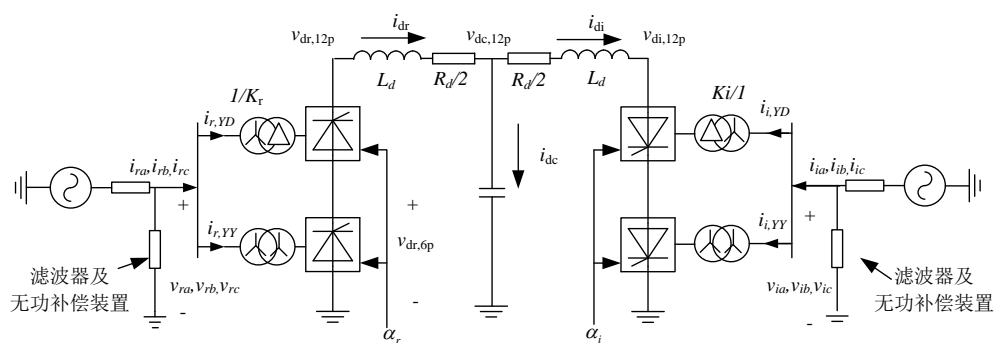


图 2-6 单极 12 脉动高压直流系统示意图

Fig. 2-6 The diagram of a monopolar 12-pules HVDC system

单极 12 脉动高压直流系统示意图如图 2-6 所示，其整流器和逆变器均由两个 6 脉动换流器组成，整流器和逆变器之间由直流线路连接。其中， $L_d$  分别为直流线路整流侧和逆变侧的平波电抗， $R_d$  为直流线路电阻， $C_d$  为直流线路对地电容；整流侧和逆变侧换流变压器网侧到阀侧的变比分别为  $1/K_r$  和  $1/K_i$ ；整流侧和逆变侧换流母线处均按照要求装有滤波器和无功补偿装置。

$v_{ra}$ 、 $v_{rb}$ 、 $v_{rc}$  和  $v_{ia}$ 、 $v_{ib}$ 、 $v_{ic}$  分别为整流侧和逆变侧换流母线对地 3 相电压； $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  和  $i_{ia}$ 、 $i_{ib}$ 、 $i_{ic}$  分别为整流侧交流系统流向整流侧换流母线的交流电流和逆变侧交流系统流向逆变侧换流母线的交流电流； $i_{ra,YD}$ 、 $i_{rb,YD}$ 、 $i_{rc,YD}$  和  $i_{ra,YD}$ 、 $i_{rb,YD}$ 、 $i_{rc,YD}$  分别表示整流侧换流母线流向整流侧  $Y-D$  型换流变压器和  $Y-Y$  型换流变压器的三相交流电流； $i_{ia,YD}$ 、 $i_{ib,YD}$ 、 $i_{ic,YD}$  和  $i_{ia,YD}$ 、 $i_{ib,YD}$ 、 $i_{ic,YD}$  分别表示逆变侧换流母线流向逆变侧  $Y-D$  型换流变压器和  $Y-Y$  型换流变压器的三相交流电流； $v_{dr,12p}$  和  $v_{dr,6p}$  分别表示 12 脉动直流系统整流侧直流电压和  $Y-Y$  型换流变压器连接的 6 脉动换流器上的直流电压； $v_{di,12p}$  和  $v_{dc,12p}$  分别表示 12 脉动直流系统逆变侧和直流线路中点电容的直流电压； $i_{dr}$ 、 $i_{di}$  分别表示直流系统整流侧、逆变侧直流电流，电流方向以整流侧流向逆变侧为正； $i_{dc}$  表示流过电容的直流电流。 $\alpha_r$ 、 $\alpha_i$  分别表示直流系统控制系统输出的整流器和逆变器的触发角。

### 2.3.2 6 脉动换流器的开关函数模型

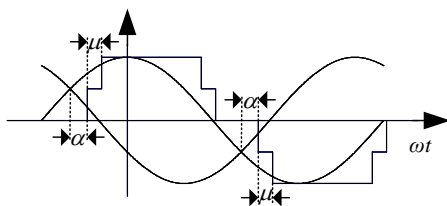


图 2-7 电压开关函数波形示意图

Fig. 2-7 The diagram of voltage switch function

6 脉动换流器是单极 12 脉动直流输电系统以及双极 12 脉动、双极双 12 脉动直流输电系统的基本组成单元，其换流器开关函数模型是分析各类直流系统换流器动态相量模型的基础。考虑了换相重叠角的换相以及偏移作用，能反映 6 脉动换流器的开关和换相过程的换流器电压开关函数示意图如图 2-7 所示。其中， $\alpha$  表示触发角， $\mu$  表示换相重叠角，其傅立叶级数表达式为：

$$S_{va} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\mu}{2}\right) \cos n\left(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2}\right) \quad (2-31)$$

其中， $n$  为正整数， $A_n = (4/\pi n) \sin(\pi n/2) \cos(\pi n/6)$ 。

对应的换流器电流开关函数傅立叶级数表达式为：

$$S_{ia} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu/2)}{n\mu} \cos n\left(\omega t - \alpha - \frac{\mu}{2}\right) \quad (2-32)$$

整流侧三相电压对称时，假设三相电压瞬时表达式为：

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ra} \cos(\omega t + \varphi_{rva}) \\ V_{rb} \cos(\omega t + \varphi_{rva} - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{rc} \cos(\omega t + \varphi_{rva} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

其中,  $V_{ra}$ 、 $V_{rb}$ 、 $V_{rc}$  为三相电压的幅值,  $\varphi_{rva}$  为  $a$  相电压的初始相位角。

此时, 整流器的电压开关函数  $S_{rva}$ 、 $S_{rvb}$ 、 $S_{rvc}$  和电流开关函数  $S_{ria}$ 、 $S_{rib}$ 、 $S_{ric}$  可以表示为:

$$\begin{cases} S_{rva} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\frac{n\mu_r}{2}) \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva}) \\ S_{rvb} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\frac{n\mu_r}{2}) \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva} - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{rvc} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\frac{n\mu_r}{2}) \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2-34)$$

$$\begin{cases} S_{ria} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu_r/2)}{n\mu_r/2} \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva}) \\ S_{rib} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu_r/2)}{n\mu_r/2} \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva} - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{ric} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu_r/2)}{n\mu_r/2} \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2-35)$$

其中,  $n$  为正整数。  $A_n = (4/\pi n) \sin(\pi n/2) \cos(\pi n/6)$ ;  $\alpha_r$  和  $\mu_r$  分别表示整流器触发角和换相角。

换相角  $\mu_r$  可由式(2-36)计算得到<sup>[44]</sup>,

$$\mu_r = \cos^{-1}(\cos \alpha_r - \frac{\sqrt{2} X_r i_{dr}}{E_r}) - \alpha_r \quad (2-36)$$

其中,  $X_r$  为换流变压器折算到阀侧的漏抗,  $E_r$  为换流变压器阀侧空载线电压的有效值。

根据换流器开关函数分析以及动态相量定义, 整流器的电压开关函数和电流开关函数的第  $k$  阶动态相量模型分别为:

$$\begin{aligned} \langle S_{rva} \rangle_k &= \frac{A_k}{2} \cos(\frac{k\mu_r}{2}) e^{jk(\varphi_{rva} - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2})} \\ \langle S_{rvb} \rangle_k &= \frac{A_k}{2} \cos(\frac{k\mu_r}{2}) e^{jk(\varphi_{rva} - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} - \frac{2\pi}{3})} \\ \langle S_{rvc} \rangle_k &= \frac{A_k}{2} \cos(\frac{k\mu_r}{2}) e^{jn(\varphi_{rva} - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \frac{2\pi}{3})} \end{aligned} \quad (2-37)$$

$$\begin{aligned}\langle S_{ria} \rangle_k &= \frac{A_k}{k\mu_r} \sin \frac{k\mu_r}{2} e^{jk(\varphi_{rva} - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2})} \\ \langle S_{rib} \rangle_k &= \frac{A_k}{k\mu_r} \sin \frac{k\mu_r}{2} e^{jk(\varphi_{rva} - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \frac{2\pi}{3})} \\ \langle S_{ria} \rangle_k &= \frac{A_k}{k\mu_r} \sin \frac{k\mu_r}{2} e^{jk(\varphi_{rva} - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \frac{2\pi}{3})}\end{aligned}\quad (2-38)$$

其中,  $k$  为非 0 的整数,  $A_k=(4/\pi k)\sin(\pi k/2)\cos(\pi k/6)$ 。

### 2.3.3 换流器动态相量模型

根据换流器的调制理论, 6 脉动换流器可用一个理想调制器表示<sup>[109]</sup>。Y-Y 型变压器连接的 6 脉动整流器的输入输出关系可表示为:

$$v_{dr,6p} = K_r(v_{ra}S_{rva} + v_{rb}S_{rvb} + v_{rc}S_{rvc}) \quad (2-39)$$

$$\begin{cases} i_{ra,YY} = K_r i_{dr} S_{ria} \\ i_{rb,YY} = K_r i_{dr} S_{rib} \\ i_{rc,YY} = K_r i_{dr} S_{rib} \end{cases} \quad (2-40)$$

其中,  $S_{rva}$ 、 $S_{rvb}$ 、 $S_{rvc}$  和  $S_{ria}$ 、 $S_{rib}$ 、 $S_{ric}$  分别表示 6 脉动整流器的电压开关函数和电流开关函数, 交流电流方向以换流母线流向整流器为正。

直流侧只考虑直流量, 即直流电压、电流只考虑其 0 阶动态相量。考虑换流变压器变比时, 根据换流器调制理论和动态相量的卷积特性以及交流系统三相对称的情况, Y-Y 型变压器连接的 6 脉动整流器直流侧电压  $v_{dr,6p}$  的 0 阶动态相量模型为:

$$\begin{aligned}\langle v_{dr,6p} \rangle_0 &= K_r (\langle v_{ra} S_{rva} \rangle_0 + \langle v_{rb} S_{rvb} \rangle_0 + \langle v_{rc} S_{rvc} \rangle_0) \\ &= K_r (\langle v_{ra} \rangle_1 \langle S_{rva} \rangle_{-1} + \langle v_{ra} \rangle_{-1} \langle S_{rva} \rangle_1 + \langle v_{rb} \rangle_1 \langle S_{rvb} \rangle_{-1} \\ &\quad + \langle v_{rb} \rangle_{-1} \langle S_{rvb} \rangle_1 + \langle v_{rc} \rangle_1 \langle S_{rvc} \rangle_{-1} + \langle v_{rc} \rangle_{-1} \langle S_{rvc} \rangle_1) \\ &= 3K_r |\langle v_{ra} \rangle_1| A_1 \cos \frac{\mu_r}{2} \cos(\alpha_r + \frac{\mu_r}{2})\end{aligned}\quad (2-41)$$

其中,  $|\langle v_{ra} \rangle_1|$  为整流侧  $a$  相电压  $v_{ra}$  的 1 阶动态相量的模值。

单极 12 脉动整流器由两个 6 脉动整流器串联而成。因此, 12 脉动整流器动态相量模型中直流侧电压  $v_{dr,12p}$  的 0 阶动态相量模型为:

$$\langle v_{dr,12p} \rangle_0 = 2 \langle v_{dr,6p} \rangle_0 \quad (2-42)$$

根据整流侧谐波电流分析, Y-Y 型变压器连接的 6 脉动整流器和 Y- $\Delta$  型变压器连接的 6 脉动整流器的网测交流电流  $i_{ra,YY}$ 、 $i_{rb,YY}$ 、 $i_{rc,YY}$  和  $i_{ra,YD}$ 、 $i_{rb,YD}$ 、 $i_{rc,YD}$  除基波外, 包含的主要特征谐波为 5 次、7 次、11 次和 13 次谐波, 而且  $i_{ra,YY}$ 、

$i_{rb,YY}$ 、 $i_{rc,YY}$  和  $i_{ra,YD}$ 、 $i_{rb,YD}$ 、 $i_{rc,YD}$  的基波以及 11 次和 13 次谐波含量相同, 5 次、7 次谐波成分相互抵消。再利用动态相量的共轭特性以及动态相量值到时域值的转换关系, 单极 12 脉动整流器动态相量模型中网侧交流电流的动态相量模型包括 1 阶、11 阶和 13 阶动态相量模型, 并可用  $Y-Y$  型变压器连接的 6 脉动整流器网侧交流电流的动态相量模型中对应的动态相量模型表示。

因为直流侧只考虑直流量, 根据换流器调制理论和动态相量的卷积理论,  $i_{ra,YY}$  的 1 阶以及 11 和 13 阶的动态相量模型的表达式分别为:

$$\begin{aligned} \langle i_{ra,YY} \rangle_1 &= K_r \langle i_{dr} S_{ira} \rangle_1 = K_r \langle i_{dr} \rangle_0 \langle S_{ira} \rangle_1 \\ \langle i_{ra,YY} \rangle_{11} &= K_r \langle i_{dr} S_{ira} \rangle_{11} = K_r \langle i_{dr} \rangle_0 \langle S_{ira} \rangle_{11} \\ \langle i_{ra,YY} \rangle_{13} &= K_r \langle i_{dr} S_{ira} \rangle_{13} = K_r \langle i_{dr} \rangle_0 \langle S_{ira} \rangle_{13} \end{aligned} \quad (2-43)$$

其中,  $\langle i_{dr} \rangle_0$  为直流系统整流侧直流电流  $i_{dr}$  的 0 阶动态相量。

则 12 脉动整流器动态相量模型中  $a$  相交流电流  $i_{ra}$  的 1 阶以及 11 和 13 阶动态相量模型的表达式分别为:

$$\begin{aligned} \langle i_{ra} \rangle_1 &= 2 \langle i_{ra,YY} \rangle_1 \\ \langle i_{ra} \rangle_{11} &= 2 \langle i_{ra,YY} \rangle_{11} \\ \langle i_{ra} \rangle_{13} &= 2 \langle i_{ra,YY} \rangle_{13} \end{aligned} \quad (2-44)$$

$b$  相和  $c$  相电流  $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  的 1 阶以及 11 和 13 阶的动态相量模型表达形式与  $a$  相相似。

逆变器动态相量模型的推导过程与整流器动态相量模型相似, 逆变器动态相量模型中直流侧电压  $v_{di,12p}$  的动态相量模型为:

$$\langle v_{di,12p} \rangle_0 = -6K_i |\langle v_{ia} \rangle_1| A_1 \cos \frac{\mu_i}{2} \cos(\alpha_i + \frac{\mu_i}{2}) \quad (2-45)$$

其中,  $|\langle v_{ia} \rangle_1|$  为逆变侧  $a$  相电压  $v_{ia}$  的 1 阶动态相量的模值,  $\alpha_i$  和  $\mu_i$  分别表示逆变器的触发角和换相角。

逆变器网侧  $a$  相交流电流的动态相量模型为:

$$\begin{aligned} \langle i_{ia} \rangle_1 &= 2K_i \langle i_{di} \rangle_0 \langle S_{iaa} \rangle_1 \\ \langle i_{ia} \rangle_{11} &= 2K_i \langle i_{di} \rangle_0 \langle S_{iaa} \rangle_{11} \\ \langle i_{ia} \rangle_{13} &= 2K_i \langle i_{di} \rangle_0 \langle S_{iaa} \rangle_{13} \end{aligned} \quad (2-46)$$

其中,  $\langle i_{di} \rangle_0$  为直流系统逆变侧直流电流  $i_{di}$  的 0 阶动态相量,  $\langle S_{iaa} \rangle_1$ ,  $\langle S_{iaa} \rangle_{11}$ ,  $\langle S_{iaa} \rangle_{13}$  分别表示  $Y-Y$  变压器连接的 6 脉动逆变器电流开关函数的 1 阶以及 11 阶和 13 阶的动态相量模型。

逆变侧网侧其余两相交流电流的动态相量与  $a$  相交流电流的动态相量模型

相似。

### 2.3.4 直流线路动态相量模型

根据图 2-6 所示的单极 12 脉动直流系统结构，直流线路的微分方程为：

$$\begin{aligned} L_d \frac{di_{dr}}{dt} &= v_{dr,12p} - v_{dc,12p} - \frac{R_d}{2} i_{dr} \\ L_d \frac{di_{di}}{dt} &= v_{dc,12p} - v_{di,12p} - \frac{R_d}{2} i_{di} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc,12p}}{dt} &= i_{dc} \end{aligned} \quad (2-47)$$

直流线路可只考虑直流分量，根据直流线路的微分方程以及动态相量的微分特性，单极 12 脉动 HVDC 系统直流线路的动态相量模型为：

$$\begin{cases} L_d \frac{d\langle i_{dr} \rangle_0}{dt} = \langle v_{dr,12p} \rangle_0 - \langle v_{dc,12p} \rangle_0 - \frac{R_d}{2} \langle i_{dr} \rangle_0 \\ L_d \frac{d\langle i_{di} \rangle_0}{dt} = \langle v_{dc,12p} \rangle_0 - \langle v_{di} \rangle_0 - \frac{R_d}{2} \langle i_{di} \rangle_0 \\ C_{dc} \frac{d\langle v_{dc,12p} \rangle_0}{dt} = \langle i_{dc} \rangle_0 \end{cases} \quad (2-48)$$

其中， $\langle v_{di,12p} \rangle_0$ 、 $\langle v_{dc,12p} \rangle_0$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0$  分别为直流电压  $v_{di,12p}$ 、 $v_{dc,12p}$  和直流电流  $i_{di}$ 、 $i_{dc}$  的 0 阶动态相量。

### 2.3.5 控制系统动态相量模型

控制系统整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定电压控制，整流侧和逆变侧均配有低压限流控制。整流侧定电流控制和逆变侧定电压控制分别为整流器和逆变器提供触发角。

控制系统考虑 0 阶动态相量，根据定电流控制器的动态方程以及动态相量的特性，整流侧定电流控制的动态相量模型为：

$$\frac{d\langle x_{ri} \rangle_0}{dt} = -\frac{1}{T_{ri}} \langle i_{dr} \rangle_0 + \frac{1}{T_{ri}} i_{drref} \quad (2-49)$$

$$\beta_{ri} = -K_{ri} \langle i_{dr} \rangle_0 + K_{ri} i_{drref} + \langle x_{ri} \rangle_0 \quad (2-50)$$

$$\alpha_r = \pi - \beta_{ri} \quad (2-51)$$

其中， $K_{ri}$  和  $T_{ri}$  分别为整流侧定电流 PI 控制器的比例常数和积分时间常数， $\langle i_{dr} \rangle_0$  为整流侧直流电流的 0 阶动态相量， $i_{drref}$  为整流侧定电流控制器的直流电流参考

值， $\beta_{ri}$  和  $\alpha_{ri}$  分别为整流侧定电流控制器输出的超前触发角和触发角。

根据逆变器定电压控制器的动态方程和动态相量的特性，逆变侧定电压控制的动态相量模型为：

$$\frac{d\langle x_{iu} \rangle_0}{dt} = -\frac{1}{T_{iu}} \langle u_{di} \rangle_0 + \frac{1}{T_{iu}} u_{diref} \quad (2-52)$$

$$\beta_{iu} = -K_{iu} \langle u_{di} \rangle_0 + K_{iu} u_{diref} + \langle x_{iu} \rangle_0 \quad (2-53)$$

$$\alpha_i = \pi - \beta_{iu} \quad (2-54)$$

其中， $K_{iu}$  和  $T_{iu}$  分别为逆变侧定电压 PI 控制器的比例常数和积分时间常数， $\langle u_{di} \rangle_0$  为逆变侧直流电压的 0 阶动态相量， $u_{diref}$  为逆变侧定电压控制器的直流电压参考值， $\beta_{iu}$  和  $\alpha_{iu}$  分别为逆变器定电压控制器输出的超前触发角和触发角。

各控制器之间的配合见 1.3.1 节。综合 HVDC 系统整流器动态相量模型、逆变器动态相量模型、直流线路动态相量模型以及控制系统动态相量模型，即为能反映 HVDC 系统换流器谐波特性的 HVDC 系统动态相量模型。

### 2.3.6 动态相量模型仿真过程

交流系统三相对称，模型仿真过程中输入量是交流系统  $a$  相电压的时域值，输出量是直流电压、电流和交流电流的时域值，模型内部仿真过程中使用动态相量进行仿真计算。仿真过程中需要动态相量值和时域值之间的相互转换。其中，时域值到动态相量值的转换按照式(2-16)所示的时域值到动态相量值的转换关系完成；根据动态相量定义，以及可反映换流器谐波特性的 HVDC 系统动态相量模型中直流电压、电流和交流电流的动态相量模型，直流电压、电流以及交流电流的动态相量值到时域值之间的转换关系为：

$$v_d(t) = \langle v_d \rangle_0(t) \quad (2-55)$$

$$i_d(t) = \langle i_d \rangle_0(t) \quad (2-56)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_1(t) \\ \langle i_b \rangle_1(t) \\ \langle i_c \rangle_1(t) \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-1}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-1}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-1}(t) \end{bmatrix} e^{-j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{11}(t) \\ \langle i_b \rangle_{11}(t) \\ \langle i_c \rangle_{11}(t) \end{bmatrix} e^{j11\omega t} \\ &+ \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-11}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-11}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-11}(t) \end{bmatrix} e^{-j11\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{13}(t) \\ \langle i_b \rangle_{13}(t) \\ \langle i_c \rangle_{13}(t) \end{bmatrix} e^{j13\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-13}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-13}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-13}(t) \end{bmatrix} e^{-j13\omega t} \\ &= 2Re \left( \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_1(t) \\ \langle i_b \rangle_1(t) \\ \langle i_c \rangle_1(t) \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{11}(t) \\ \langle i_b \rangle_{11}(t) \\ \langle i_c \rangle_{11}(t) \end{bmatrix} e^{j11\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{13}(t) \\ \langle i_b \rangle_{13}(t) \\ \langle i_c \rangle_{13}(t) \end{bmatrix} e^{j13\omega t} \right) \end{aligned} \quad (2-57)$$

HVDC 系统动态相量模型仿真计算方法为：将直流线路和控制器的动态相量模型使用隐式梯形积分法进行差分化处理，再将差分化后的直流线路和控制器的动态相量模型和换流器动态相量模型配合进行仿真。

动态相量模型仿真程序总体框图如图 2-8 所示，仿真过程中控制系统动态相量模型滞后换流器、直流线路动态相量模型一个仿真步长。

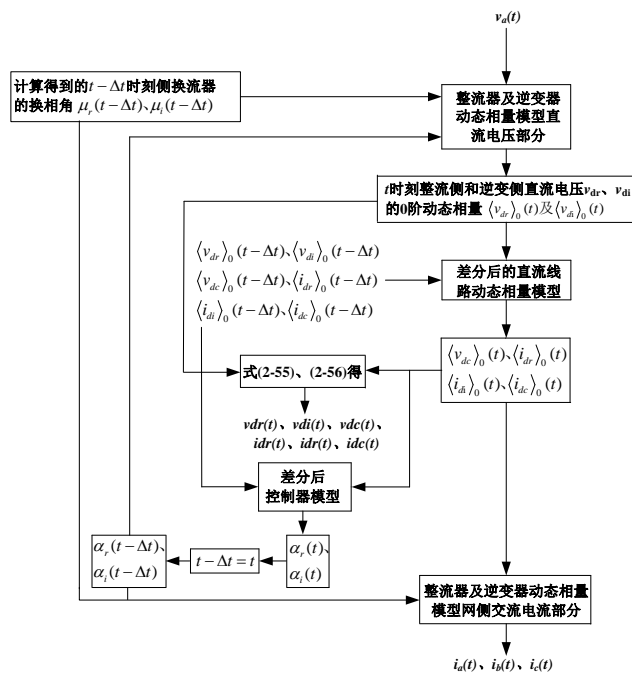


图 2-8 HVDC 系统动态相量模型仿真流程图

Fig. 2-8 Simulation flow chart of HVDC dynamic phasors model

HVDC 系统动态相量模型整体仿真程序步骤如下：

步骤 1：将直流线路的动态相量模型和控制器中定电流控制器、定电压控制器动态相量模型进行差分化处理；

步骤 2：设置仿真初始时刻  $t_0$ ，仿真结束时刻  $t_{end}$ ，仿真步长  $\Delta t$ ；

步骤 3：输入量为整流侧、逆变侧  $a$  相交流系统电压  $v_{ar}$  和  $v_{ai}$ ， $t-\Delta t$  时刻整流器和逆变器触发角的仿真值  $\alpha_r(t-\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t-\Delta t)$  以及直流侧直流电压、电流动态相量仿真值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$  和直流电流动态相量仿真值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$  以及根据式(2-36)计算得到的  $t-\Delta t$  时刻整流器和逆变器的换相角  $\mu_r(t-\Delta t)$ 、 $\mu_i(t-\Delta t)$ ；

步骤 4：根据式(2-16)计算得到  $t$  时刻整流侧、逆变侧  $a$  相交流系统电压动态相量值；

步骤 5： $t$  时刻整流侧、逆变侧  $a$  相交流系统电压动态相量值以及  $t-\Delta t$  时刻的  $\alpha_r(t-\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t-\Delta t)$  和  $\mu_r(t-\Delta t)$ 、 $\mu_i(t-\Delta t)$ ，送入整流器、逆变器动态相量模

型的电压部分,求得  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t)$ ;

步骤 6: 将  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t)$ 、 $t-\Delta t$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$  和  $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$ , 送入差分后的直流线路动态相量模型求得  $t$  时刻电容直流电压、直流电流以及整流侧和逆变侧直流电流的动态相量值  $\langle v_{dc} \rangle_0(t)$  和  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t)$ ;

步骤 7:  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_0(t)$  和  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t)$ , 根据式(2-55)、(2-56)求得  $t$  时刻直流侧直流电压、电流的时域值  $v_{dr}(t)$ 、 $v_{di}(t)$ 、 $v_{dc}(t)$  和  $i_{dr}(t)$ 、 $i_{di}(t)$ 、 $i_{dc}(t)$ ;

步骤 8:  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$  和  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ ,  $t-\Delta t$  时刻整流侧和逆变侧触发角  $\alpha_r(t-\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t-\Delta t)$ , 以及计算得到的  $t-\Delta t$  时刻整流器和逆变器的换相角  $\mu_r(t-\Delta t)$ 、 $\mu_i(t-\Delta t)$ , 送入整流器和逆变器动态相量模型的网侧交流电流部分, 求得  $t$  时刻整流器和逆变器网侧三相交流电流的 1 阶、11 阶和 13 阶动态相量值;

步骤 9:  $t$  时刻整流器、逆变器网侧三相交流电流的动态相量值根据式(2-57)求得  $t$  时刻整流器和逆变器网侧三相交流电流的时域值;

步骤 10:  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压、电流动态相量值  $\langle u_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ , 以及  $t-\Delta t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压、电流动态相量值  $\langle u_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$  送入控制器模型, 求得  $t$  时刻整流侧和逆变侧的触发角  $\alpha_r(t)$ 、 $\alpha_i(t)$ ;

步骤 11: 检测是否为仿真结束时刻  $t=t_{end}$ , 如果是, 则仿真结束; 如果不是, 则令  $t-\Delta t=t$ , 返回步骤 3 循环。

## 2.4 仿真分析

### 2.4.1 仿真测试系统

仿真测试系统为图 2-6 所示的单极 12 脉动高压直流输电系统, 一次系统参数为: 系统频率 50Hz, 整流侧交流系统电源线电压有效值为 382.8672kV, 整流侧换流变压器变比为  $1/K_r=345/213.4557$ , 整流侧换流变压的容量为 603.73MVA 逆变侧交流系统电源线电压有效值为 215.05kV, 逆变侧换流变压器变比为  $1/K_i=230/209.2288$ , 逆变侧换流变压的容量为 591.79MVA, 换流变压器漏抗标幺值

为 0.18pu, 整流侧及逆变侧换流母线处均装有 11 次及 13 次滤波器和无功补偿装置。直流系统额定电压 500kV, 额定电流 2kA, 直流线路电阻  $5\Omega$ , 直流线路整流侧和逆变侧的平波电感均为 0.5968H, 直流线路对地电容 50 $\mu$ F。控制系统整流侧采用定电流控制, 逆变侧采用定电压控制, 同时整流侧和逆变侧均配有低压限流控制。

在 MATLAB 中应用本文提出的建模仿真方法, 编程实现了测试系统的动态相量建模仿真; 在 MATLAB 中根据文献[41]提出的不考虑直流系统换流器谐波特性的高压直流系统动态相量模型, 编程实现了相应的动态相量建模仿真; 并在电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 中搭建了相应的电磁暂态模型。其中, 动态相量模型仿真步长为 100  $\mu$ s, 电磁暂态模型仿真步长为 50  $\mu$ s。

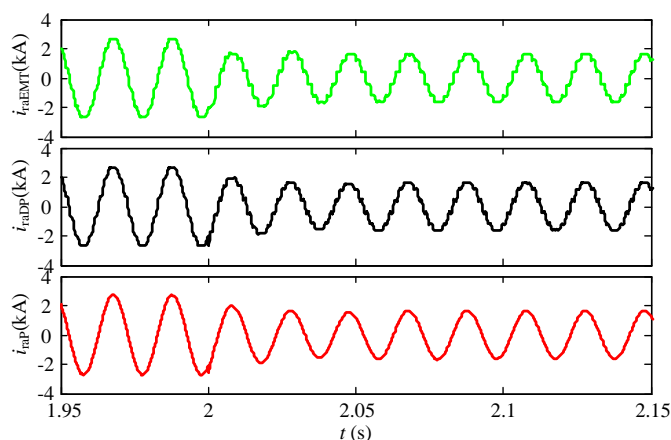
## 2.4.2 仿真结果

使用所建模型在下列直流系统扰动和交流系统扰动情况下进行了仿真对比分析。

算例 1: 直流系统扰动-高压直流系统电流参考值  $I_{dref}$  在  $t=2$ s 时从 1 变到 0.6;

算例 2: 交流系统扰动-整流侧交流电源电压在  $t=2$ s 时跌落 5%, 这类故障一般是由远方系统故障引起的<sup>[41]</sup>。

两种扰动下动态相量建模仿真和电磁暂态仿真所得的整流侧换流母线流向直流系统的  $a$  相交流电流、整流侧换流母线  $a$  相交流电压、直流系统整流侧电流分别如图 2-9-图 2-11 所示。其中,  $i_{raEMT}$ 、 $v_{raEMT}$ 、 $i_{drEMT}$  是电磁暂态仿真得到的交流系统电流、电压以及直流系统电流;  $i_{raDP}$ 、 $v_{raDP}$ 、 $i_{drDP}$  是所提直流系统动态相量模型仿真得到的交流系统电流、电压以及直流系统电流;  $i_{raP}$ 、 $v_{raP}$ 、 $i_{drP}$  是根据文献[41]所提的直流系统动态相量模型仿真得到的交流系统电流、电压以及直流系统电流。



a) 算例 1  
a) Case 1

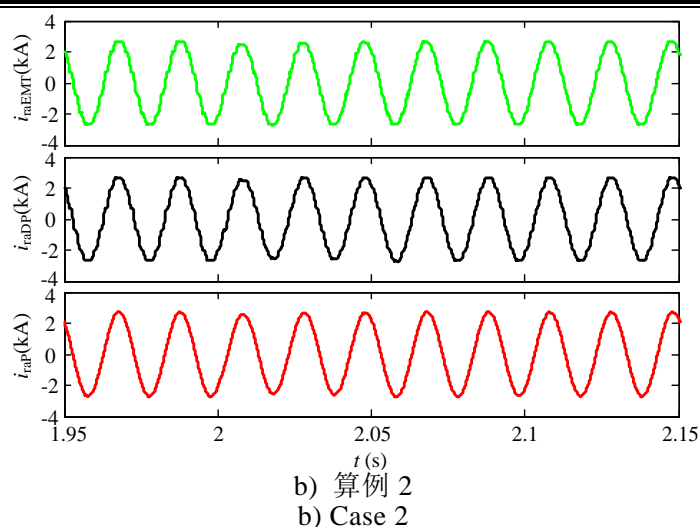


图 2-9 整流侧换流母线流向直流系统电流仿真结果对比

Fig. 2-9 Simulation results of alternating current from commutation bus to DC system at rectifier side

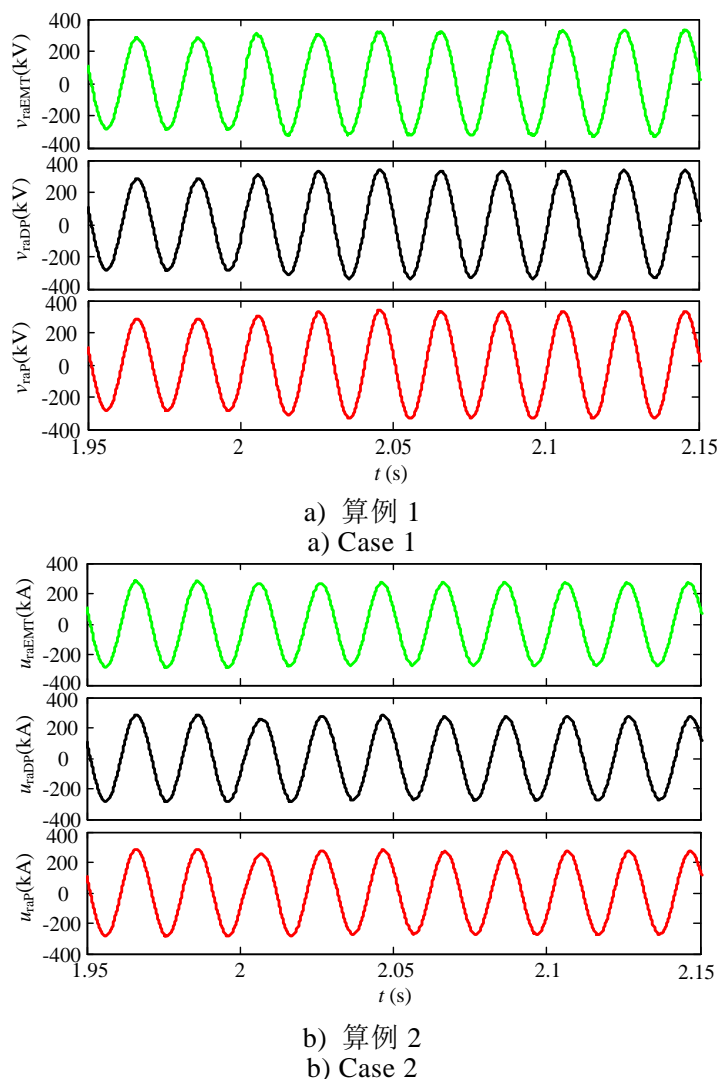
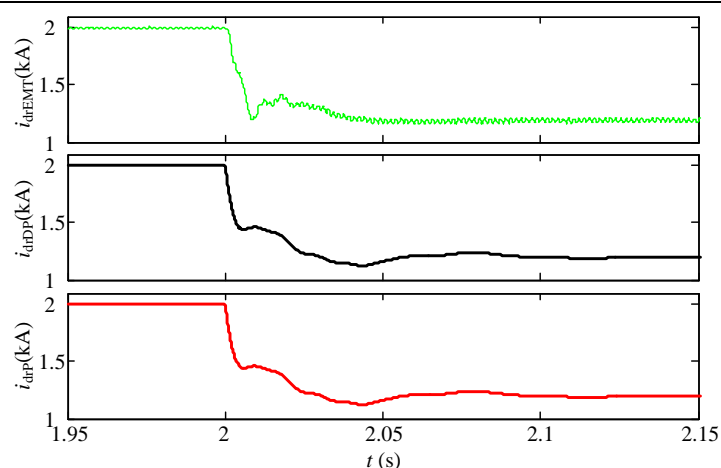
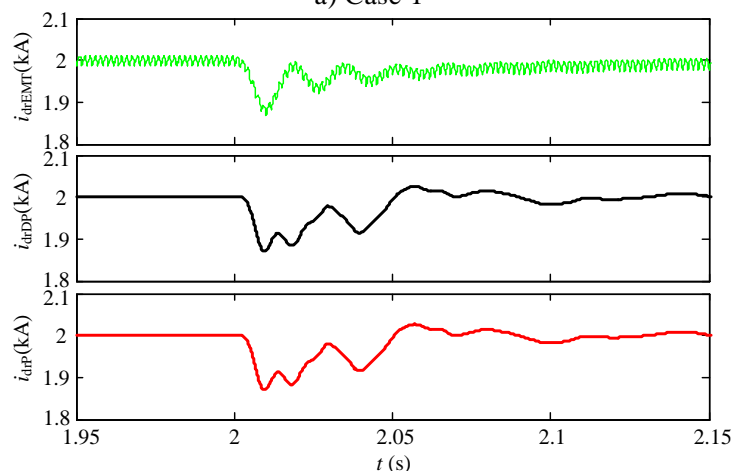


图 2-10 整流侧换流母线电压仿真结果

Fig. 2-10 Simulation results of commutation bus voltage at rectifier side



a) 算例 1  
a) Case 1



b) 算例 2  
b) Case 2

图 2-11 直流电流仿真结果

Fig. 2-11 Direct current simulation results

从图 2-9-图 2-11 的仿真结果可看出，所提能反应直流系统换流器谐波特性的直流系统动态相量模型与文献[41]所提直流系统动态相量模型和直流系统电磁暂态模型相比，能在较大步长的情况下，有效反应交直流系统扰动下，包含直流系统换流器对交流系统的谐波特性在内的直流系统的动态特性。此外，直流系统动态相量模型中换流器模型属于代数模型，仿真步长较长，并且文献[44]对直流系统动态相量模型能有效减少仿真时间做了详细分析；因此可知直流系统动态相量模型能有效提高仿真速度，减少仿真时间。

## 2.5 本章小结

本章使用动态相量理论建立了交流对称情况下，能反应直流系统换流器谐波特性的单极 12 脉动 HVDC 系统的动态相量模型，该模型包含换流器、直流线路

---

以及控制器的动态相量模型；并分析了所提直流系统动态相量模型的仿真过程。

在 MATLAB 中编程实现了所提 HVDC 系统动态相量模型及其仿真过程，并与文献[41]所提直流系统动态相量模型以及电磁暂态模型仿真结果进行了对比。对比分析表明，所提直流系统动态相量模型能在使用代数形式的换流器动态相量模型以及较大仿真步长的情况下，可反映直流系统在直流系统扰动和交流系统扰动下，包含直流系统换流器与交流系统之间的谐波动态特性在内的直流系统动态特性，验证了所提动态相量模型及仿真方法的有效性和准确性。完善了直流系统动态相量模型。

## 第3章 交流不对称情况下的高压直流系统 三相动态相量模型

### 3.1 引言

为扩展直流系统动态相量模型的使用范围，文献[43]和[44]建立了交流系统不对称情况下的 HVDC 系统换流器的动态相量模型。其中，文献[43]未考虑交流系统不对称情况时，直流系统的频率特性；文献[44]建立了能反应交流系统不对称情况时，能反应直流系统换流器谐波特性的 HVDC 系统换流器三相动态相量模型。

本章在上述研究的基础上，根据上一章建立的反应直流系统换流器开关和换相过程的换流器开关函数模型，以及交流系统不对称故障下 HVDC 系统的频率特性，建立了包含换流器、直流线路和控制系统的，能反应交流系统不对称状态下 HVDC 系统动态特性的 HVDC 系统三相动态相量模型。

本章首先建立了该模型的换流器、直流线路三相动态相量模型和控制系统动态相量模型；并分析了该模型的仿真流程。在 MATLAB 中编程实现了该模型在不同交流系统不对称故障下的动态仿真，将所提模型得到的仿真结果和文献[44]所提模型的仿真结果以及 PSCAD/EMTDC 中的电磁暂态仿真模型得到的仿真结果进行了对比分析。完善了交流系统不对称情况下的 HVDC 系统三相动态相量模型，扩大了 HVDC 系统动态相量模型的使用范围。

### 3.2 三相动态相量简介

假设三相系统中三相信号为： $x_a(t)$ ， $x_b(t)$ ， $x_c(t)$ ，根据三相动态相量理论，当三相不平衡时，其对应的动态相量可采用对称分量法进行分析。在任意区间  $\tau \in (t-T, t)$  内，三相信号可以表示为：

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{jk\omega_s\tau} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle x_p \rangle_k \\ \langle x_n \rangle_k \\ \langle x_s \rangle_k \end{bmatrix}(t) \quad (3-1)$$

其中， $a = e^{j2\pi/3}$ ； $\langle x_p \rangle_k$ ， $\langle x_n \rangle_k$ ， $\langle x_s \rangle_k$  分别为正、负、零序分量对应的动态相量。

设，

$$A = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}, \quad A^{-1} = A^H \quad (3-2)$$

根据三相动态相量理论，有：

$$\begin{bmatrix} \langle x_p \rangle_k \\ \langle x_n \rangle_k \\ \langle x_s \rangle_k \end{bmatrix} (t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t A^H \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} (\tau) e^{-jk\omega_s \tau} d\tau \quad (3-3)$$

三相动态相量的微分关系可表示为：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \langle x_p \rangle_k \\ \langle x_n \rangle_k \\ \langle x_s \rangle_k \end{bmatrix} (t) = A^H \begin{bmatrix} \left\langle \frac{dx_a}{dt} \right\rangle_k \\ \left\langle \frac{dx_b}{dt} \right\rangle_k \\ \left\langle \frac{dx_c}{dt} \right\rangle_k \end{bmatrix} (t) - jk\omega_s \begin{bmatrix} \langle x_p \rangle_k \\ \langle x_n \rangle_k \\ \langle x_s \rangle_k \end{bmatrix} (t) \quad (3-4)$$

### 3.3 高压直流系统三相动态相量模型建模与仿真方法

#### 3.3.1 换流器三相动态相量模型

假设整流侧交流系统三相电压不对称时，三相电压为：

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ra} \cos(\omega t + \varphi_{rva}) \\ V_{rb} \cos(\omega t + \varphi_{rvb} - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{rc} \cos(\omega t + \varphi_{rvc} + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

其中， $V_{ra}$ 、 $V_{rb}$ 、 $V_{rc}$  和  $\varphi_{rva}$ 、 $\varphi_{rvb}$ 、 $\varphi_{rvc}$  分别为三相电压的幅值和初始相位角。

此时，整流器的电压开关函数  $S_{rva}$ 、 $S_{rvb}$ 、 $S_{rvc}$  和电流开关函数  $S_{ria}$ 、 $S_{rib}$ 、 $S_{ric}$  可以表示为：

$$\begin{cases} S_{rva} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\mu_r}{2}\right) \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva}) \\ S_{rvb} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\mu_r}{2}\right) \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rvb} - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{rvc} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{n\mu_r}{2}\right) \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rvc} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\begin{cases} S_{ria} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu_r/2)}{n\mu_r/2} \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva}) \\ S_{rib} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu_r/2)}{n\mu_r/2} \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rvb} - \frac{2\pi}{3}) \\ S_{rca} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(n\mu_r/2)}{n\mu_r/2} \cos n(\omega t - \alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rvc} + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3-7)$$

其中,  $n$  为正整数。 $A_n=(4/\pi n)\sin(\pi n/2)\cos(\pi n/6)$ ;  $\alpha_r$  和  $\mu_r$  分别表示整流器触发角和换相角。

交流系统不对称故障状态下, 假设电力系统的基波频率为  $f_0$ , 直流系统换流器直流侧直流电压、电流应考虑直流量和 2 次谐波分量, 换流器交流侧交流电流应考虑基波分量和 3 次谐波分量能反应直流系统的动态特性。因此, 换流器直流电压动态相量模型包括 0 阶和  $\pm 2$  阶动态相量模型, 换流器交流电流动态相量模型包括  $\pm 1$  阶和  $\pm 3$  阶动态相量模型<sup>[44]</sup>。

根据本文换流器开关函数模型以及换流器调制理论<sup>[109]</sup>和动态相量理论, 交流系统发生不对称故障时, HVDC 系统整流器三相动态相量模型的直流侧电压  $v_{dr}$  的 0 阶动态相量模型为:

$$\begin{aligned} \langle v_{dr} \rangle_0 &= \langle v_{ra} S_{rva} \rangle_0 + \langle v_{rb} S_{rvb} \rangle_0 + \langle v_{rc} S_{rvc} \rangle_0 \\ &= \langle v_{ra} \rangle_1 \langle S_{rva} \rangle_{-1} + \langle v_{rb} \rangle_1 \langle S_{rvb} \rangle_{-1} + \langle v_{rc} \rangle_1 \langle S_{rvc} \rangle_{-1} \\ &\quad + \langle v_{ra} \rangle_{-1} \langle S_{rva} \rangle_1 + \langle v_{rb} \rangle_{-1} \langle S_{rvb} \rangle_1 + \langle v_{rc} \rangle_{-1} \langle S_{rvc} \rangle_1 \\ &= \frac{1}{2} (V_{ra} + V_{rb} + V_{rc}) A_1 \cos \frac{\mu_r}{2} \cos(\alpha_r + \frac{\mu_r}{2}) \end{aligned} \quad (3-8)$$

HVDC 系统整流器三相动态相量模型的直流侧电压  $v_{dr}$  的 2 阶动态相量模型为:

$$\begin{aligned} \langle v_{dr} \rangle_2 &= \langle v_{ra} S_{rva} \rangle_2 + \langle v_{rb} S_{rvb} \rangle_2 + \langle v_{rc} S_{rvc} \rangle_2 \\ &= \langle v_{ra} \rangle_1 \langle S_{rva} \rangle_1 + \langle v_{rb} \rangle_1 \langle S_{rvb} \rangle_1 + \langle v_{rc} \rangle_1 \langle S_{rvc} \rangle_1 \\ &= \frac{A_1}{4} \cos \frac{\mu_r}{2} (V_{ra} e^{j(-\alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + 2\varphi_{rva})} + V_{rb} e^{j(-\alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + 2\varphi_{rvb} - \frac{4\pi}{3})} \\ &\quad + V_{rc} e^{j(-\alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + 2\varphi_{rvc} + \frac{4\pi}{3})}) \end{aligned} \quad (3-9)$$

HVDC 系统整流器三相动态相量模型的交流侧电流  $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  的 1 阶和 3 阶动态相量模型分别为:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \langle i_{ra} \rangle_1(t) \\ \langle i_{rb} \rangle_1(t) \\ \langle i_{rc} \rangle_1(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_{dr} S_{ria} \rangle_1(t) \\ \langle i_{dr} S_{rib} \rangle_1(t) \\ \langle i_{dr} S_{ric} \rangle_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle i_{dr} \rangle_0(t) \langle S_{ria} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{ria} \rangle_1^*(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_0(t) \langle S_{rib} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{rib} \rangle_1^*(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_0(t) \langle S_{ric} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{ric} \rangle_1^*(t) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \langle i_{ra} \rangle_3(t) \\ \langle i_{rb} \rangle_3(t) \\ \langle i_{rc} \rangle_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_{dr} S_{ria} \rangle_3(t) \\ \langle i_{dr} S_{rib} \rangle_3(t) \\ \langle i_{dr} S_{ric} \rangle_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{ria} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2^*(t) \langle S_{ria} \rangle_5(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{rib} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2^*(t) \langle S_{rib} \rangle_5(t) \\ \langle i_{dr} \rangle_2(t) \langle S_{ric} \rangle_1(t) + \langle i_{dr} \rangle_2^*(t) \langle S_{ric} \rangle_5(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-10}$$

其中,

$$\begin{aligned}
 \langle S_{ria} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_r} \sin \frac{n\mu_r}{2} e^{jn(-\alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rva})} \\
 \langle S_{rib} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_r} \sin \frac{n\mu_r}{2} e^{jn(-\alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rvb} - \frac{2\pi}{3})} \\
 \langle S_{ria} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_r} \sin \frac{n\mu_r}{2} e^{jn(-\alpha_r - \frac{\mu_r}{2} + \varphi_{rvc} + \frac{2\pi}{3})}
 \end{aligned}$$

逆变器三相动态相量模型的推导过程和整流器三相动态相量模型推导过程相似, 其直流侧直流电压  $v_{di}$  的 0 阶和 2 阶动态相量分别为:

$$\langle v_{di} \rangle_0 = -\frac{1}{2} (V_{ia} + V_{ib} + V_{ic}) A_1 \cos \frac{\mu_i}{2} \cos(\alpha_i + \frac{\mu_i}{2}) \tag{3-11}$$

$$\begin{aligned}
 \langle v_{di} \rangle_2 &= -\frac{A_1}{4} \cos \frac{\mu_i}{2} (V_{ia} e^{j(-\alpha_i - \frac{\mu_i}{2} + 2\varphi_{iva})} + V_{ib} e^{j(-\alpha_i - \frac{\mu_i}{2} + 2\varphi_{ivb} - \frac{4\pi}{3})} \\
 &\quad + V_{ic} e^{j(-\alpha_i - \frac{\mu_i}{2} + 2\varphi_{ivc} + \frac{4\pi}{3})})
 \end{aligned} \tag{3-12}$$

其中,  $V_{ia}$ 、 $V_{ib}$ 、 $V_{ic}$  和  $\varphi_{iva}$ 、 $\varphi_{ivb}$ 、 $\varphi_{ivc}$  分别为逆变器三相电压的幅值和初始相位角,  $\alpha_i$  和  $\mu_i$  分别表示逆变器触发角和换相角。

逆变器三相动态相量模型的交流侧交流电流  $i_{ia}$ 、 $i_{ib}$ 、 $i_{ic}$  的 1 阶和 3 阶动态相量分别为:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \langle i_{ia} \rangle_1(t) \\ \langle i_{ib} \rangle_1(t) \\ \langle i_{ic} \rangle_1(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_{di} S_{iia} \rangle_1(t) \\ \langle i_{di} S_{iib} \rangle_1(t) \\ \langle i_{di} S_{iic} \rangle_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle i_{di} \rangle_0(t) \langle S_{iia} \rangle_1(t) + \langle i_{di} \rangle_2(t) \langle S_{iia} \rangle_1^*(t) \\ \langle i_{di} \rangle_0(t) \langle S_{iib} \rangle_1(t) + \langle i_{di} \rangle_2(t) \langle S_{iib} \rangle_1^*(t) \\ \langle i_{di} \rangle_0(t) \langle S_{iic} \rangle_1(t) + \langle i_{di} \rangle_2(t) \langle S_{iic} \rangle_1^*(t) \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} \langle i_{ia} \rangle_3(t) \\ \langle i_{ib} \rangle_3(t) \\ \langle i_{ic} \rangle_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_{di} S_{iia} \rangle_3(t) \\ \langle i_{di} S_{iib} \rangle_3(t) \\ \langle i_{di} S_{iic} \rangle_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle i_{di} \rangle_2(t) \langle S_{iia} \rangle_1(t) + \langle i_{di} \rangle_2^*(t) \langle S_{iia} \rangle_5(t) \\ \langle i_{di} \rangle_2(t) \langle S_{iib} \rangle_1(t) + \langle i_{di} \rangle_2^*(t) \langle S_{iib} \rangle_5(t) \\ \langle i_{di} \rangle_2(t) \langle S_{iic} \rangle_1(t) + \langle i_{di} \rangle_2^*(t) \langle S_{iic} \rangle_5(t) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3-13}$$

其中,

$$\begin{aligned}\langle S_{ia} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_i} \sin \frac{n\mu_i}{2} e^{jn(-\alpha_i - \frac{\mu_i}{2} + \varphi_{va})} \\ \langle S_{ib} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_i} \sin \frac{n\mu_i}{2} e^{jn(-\alpha_i - \frac{\mu_i}{2} + \varphi_{vb} - \frac{2\pi}{3})} \\ \langle S_{ia} \rangle_n(t) &= \frac{A_n}{n\mu_i} \sin \frac{n\mu_i}{2} e^{jn(-\alpha_i - \frac{\mu_i}{2} + \varphi_{vc} + \frac{2\pi}{3})}\end{aligned}$$

### 3.3.2 直流线路三相动态相量模型

根据 HVDC 系统直流线路的微分方程和直流侧的频率特性<sup>[44]</sup>以及动态相量的微分特性，直流线路的三相动态相量模型为：

$$\begin{cases} L_d \frac{d\langle i_{dr} \rangle_0}{dt} = \langle v_{dr} \rangle_0 - \langle v_{dc} \rangle_0 - \frac{R_d}{2} \langle i_{dr} \rangle_0 \\ L_d \frac{d\langle i_{di} \rangle_0}{dt} = \langle v_{dc} \rangle_0 - \langle v_{di} \rangle_0 - \frac{R_d}{2} \langle i_{di} \rangle_0 \\ C_{dc} \frac{d\langle v_{dc} \rangle_0}{dt} = \langle i_{dc} \rangle_0 \end{cases} \quad (3-14)$$

$$\begin{cases} L_d \frac{d\langle i_{dr} \rangle_2}{dt} = \langle v_{dr} \rangle_2 - \langle v_{dc} \rangle_2 - \frac{R_d}{2} \langle i_{dr} \rangle_2 - j2\omega L_d \langle i_{dr} \rangle_2 \\ L_d \frac{d\langle i_{di} \rangle_2}{dt} = \langle v_{di} \rangle_2 - \langle v_{dc} \rangle_2 - \frac{R_d}{2} \langle i_{di} \rangle_2 - j2\omega L_d \langle i_{di} \rangle_2 \\ C_{dc} \frac{d\langle v_{dc} \rangle_2}{dt} = \langle i_{dc} \rangle_2 - j2\omega C_{dc} \langle v_{dc} \rangle_2 \end{cases}$$

### 3.3.3 控制系统动态相量模型

控制系统采用整流器定电流控制，逆变器定熄弧角控制，整流器和逆变器均配有低压限流控制环节，逆变器配有电流偏差控制环节。

根据预测型定熄弧角控制的控制规律，其动态相量模型如下所示：

$$\beta_i = \arccos(\cos(\gamma_{ref} + \gamma_{err}) - \frac{6}{\pi V_{di0}} \omega L_i \langle i_{di} \rangle_0) \quad (3-15)$$

$$\alpha_i = \pi - \beta_i \quad (3-16)$$

其中， $\gamma_{ref}$  表示定熄弧角控制器的熄弧角参考值， $\gamma_{err}$  表示电流偏差控制环节输出的熄弧角的增量。

各控制器之间的配合见 1.3.1 节。综合 HVDC 系统整流器和逆变器的三相动态相量模型、直流线路动态相量模型以及控制系统动态相量模型，即为能反映交

流系统不对称情况下 HVDC 系统动态特性的 HVDC 系统三相动态相量模型。

### 3.3.4 三相动态相量模型仿真过程

模型仿真过程中，输入量是交流系统三相电压时域值，输出量是直流电压、电流以及交流电流的时域值，模型内部使用动态相量进行仿真计算。仿真过程中需要动态相量与时域值进行相互转换。其中，时域值到动态相量值的转换与第二章中时域值到动态相量值的转换过程相同；根据动态相量定义与 HVDC 系统三相动态相量模型中直流电压、电流和交流电流动态相量模型，直流电压、电流以及交流电流的动态相量值到时域值之间的转换关系为：

$$\begin{aligned} v_d(t) &= \langle v_d \rangle_0(t) + \langle v_d \rangle_2(t)e^{j2\omega t} + \langle v_d \rangle_{-2}(t)e^{-j2\omega t} \\ &= \langle v_d \rangle_0(t) + 2\operatorname{Re}(\langle v_d \rangle_2(t)e^{j2\omega t}) \end{aligned} \quad (3-17)$$

$$\begin{aligned} i_d(t) &= \langle i_d \rangle_0(t) + \langle i_d \rangle_2(t)e^{j2\omega t} + \langle i_d \rangle_{-2}(t)e^{-j2\omega t} \\ &= \langle i_d \rangle_0(t) + 2\operatorname{Re}(\langle i_d \rangle_2(t)e^{j2\omega t}) \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_1(t) \\ \langle i_b \rangle_1(t) \\ \langle i_c \rangle_1(t) \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-1}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-1}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-1}(t) \end{bmatrix} e^{-j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_3(t) \\ \langle i_b \rangle_3(t) \\ \langle i_c \rangle_3(t) \end{bmatrix} e^{j3\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_{-3}(t) \\ \langle i_b \rangle_{-3}(t) \\ \langle i_c \rangle_{-3}(t) \end{bmatrix} e^{-j3\omega t} \\ &= 2\operatorname{Re} \left( \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_1(t) \\ \langle i_b \rangle_1(t) \\ \langle i_c \rangle_1(t) \end{bmatrix} e^{j\omega t} + \begin{bmatrix} \langle i_a \rangle_3(t) \\ \langle i_b \rangle_3(t) \\ \langle i_c \rangle_3(t) \end{bmatrix} e^{j3\omega t} \right) \end{aligned} \quad (3-19)$$

HVDC 三相动态相量模型仿真计算方法为：将直流线路和控制器的动态相量模型使用隐式梯形积分法进行差分化处理，再将差分化后的直流线路动态相量模型和控制器的动态相量模型以及换流器动态相量模型相互配合，进行仿真。

高压直流系统的三相动态相量模型仿真流程图如图 3-1 所示，仿真过程中控制系统动态相量模型滞后换流器、直流线路动态相量模型一个仿真步长。

HVDC 系统三相动态相量模型仿真步骤如下：

步骤 1：直流线路三相动态相量模型以及控制器中定电流控制器动态相量模型进行差分化处理；

步骤 2：设仿真的初始时刻为  $t_0$ ，仿真结束时刻为  $t_{end}$ ，仿真步长为  $\Delta t$ ；

步骤 3：输入量为整流侧、逆变侧的交流系统三相电压  $v_{ar}$ 、 $v_{br}$ 、 $v_{cr}$ 、 $v_{ai}$ 、 $v_{bi}$ 、 $v_{ci}$ ， $t-\Delta t$  时刻整流侧、逆变侧的触发角仿真值  $\alpha_r(t-\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t-\Delta t)$ ，直流侧直流电压、电流的动态相量仿真值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_2(t-\Delta t)$  和  $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、

$\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_2(t-\Delta t)$  以及根据式(2-36)计算得到的  $t-\Delta t$  时刻整流器和逆变器的换相角  $\mu_r(t-\Delta t)$ 、 $\mu_i(t-\Delta t)$ ；

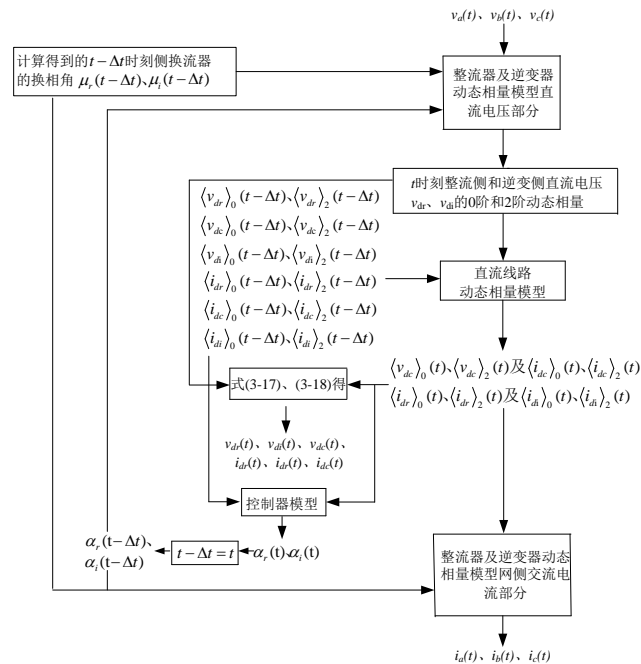


图 3 - 1HVDC 系统三相动态相量模型仿真流程图

Fig. 3-1 Simulation flow chart of HVDC three phases dynamic phasor model

步骤 4: 根据式(2-16)计算得到  $t$  时刻整流侧、逆变侧交流系统三相电压的动态相量值；

步骤 5:  $t$  时刻整流侧、逆变侧交流系统三相电压的动态相量值以及  $t-\Delta t$  时刻的  $\alpha_r(t-\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t-\Delta t)$  和  $\mu_r(t-\Delta t)$ 、 $\mu_i(t-\Delta t)$ ，根据整流器、逆变器的三相动态相量模型中电压部分求得  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压的动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle v_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t)$ 。

步骤 6:  $t$  时刻整流侧、逆变侧直流电压的动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle v_{di} \rangle_0$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2$ ， $t-\Delta t$  时刻整流侧、逆变侧以及电容的直流电压的动态相量值  $\langle v_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_2(t-\Delta t)$  以及直流电流的动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_2(t-\Delta t)$ ，根据差分处理后的直流线路的动态相量模型求得  $t$  时刻电容直流电压、电流以及整流侧、逆变侧直流电流的动态相量值  $\langle v_{dc} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_2(t)$  和  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_2(t)$ 。

步骤 7:  $t$  时刻整流侧、逆变侧以及电容的直流电压、电流的动态相量值

$\langle v_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dr} \rangle_2(t)$ 、 $\langle v_{di} \rangle_0$ 、 $\langle v_{di} \rangle_2$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dc} \rangle_2(t)$ 和 $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_2(t)$ ，根据式(3-17)、(3-18)计算得到  $t$  时刻整流侧、逆变侧以及电容的直流电压、电流的时域值  $v_{dr}(t)$ 、 $v_{di}(t)$ 、 $v_{dc}(t)$ 和  $i_{dr}(t)$ 、 $i_{di}(t)$ 、 $i_{dc}(t)$ ；

步骤 8:  $t$ 时刻整流侧、逆变侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_2(t)$  及  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_2(t)$ ， $t-\Delta t$ 时刻整流侧、逆变侧触发角  $\alpha_r(t-\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t-\Delta t)$ ，以及计算得到的  $t-\Delta t$ 时刻整流器和逆变器的换相角  $\mu_r(t-\Delta t)$ 、 $\mu_i(t-\Delta t)$ ，根据整流器、逆变器的三相动态相量模型中交流电流部分，求得  $t$ 时刻整流器、逆变器的交流三相电流的动态相量值；

步骤 9:  $t$ 时刻整流器、逆变器交流三相电流的动态相量值，根据式(3-19)求得  $t$ 时刻整流器和逆变器三相交流电流的时域值；

步骤 10:  $t$ 时刻整流侧、逆变侧直流电流的动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$  及  $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ ， $t-\Delta t$ 时刻整流侧、逆变侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t-\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t-\Delta t)$ ，根据控制器模型，求得  $t$ 时刻整流侧、逆变侧触发角  $\alpha_r(t)$ 、 $\alpha_i(t)$ 。

步骤 11: 检测是否到仿真结束时刻  $t=t_{end}$ ，如果是，仿真结束；如果不是，则令  $t-\Delta t=t$ ，返回步骤 3 进行循环。

## 3.4 仿真分析

### 3.4.1 仿真测试系统

仿真测试系统为图 2-6 的单极 12 脉动 HVDC 系统，一次系统参数与第二章中测试系统的参数相同。控制系统整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定熄弧角控制，同时整流侧和逆变侧均配有低压限流控制，逆变侧配有电流偏差控制。

在 Matlab 中应用本文提出的建模仿真方法，编程实现了测试系统的 HVDC 系统动态相量建模仿真；在 Matlab 中根据文献[44]提出的 HVDC 系统三相动态相量模型，编程实现了相应的 HVDC 系统三相动态相量建模仿真；并在电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 中搭建了相应的电磁暂态模型。其中，动态相量模型的仿真步长设置为  $100 \mu s$ ，电磁暂态模型的仿真步长设置为  $50 \mu s$ 。

### 3.4.2 仿真结果

使用所建模型在下列 3 种故障情况下进行了仿真对比分析。其中，逆变侧故障为不引起换相失败的故障类型，即逆变侧交流系统发生经过渡电阻接地故障。

故障 1: 整流侧交流系统在 1.5s 时发生持续时间 0.05s 的  $a$  相金属性接地故障;

故障 2: 整流侧交流系统在 1.5s 时发生持续时间 0.1s 的  $a$  相金属性接地故障, 在 1.54s 发生持续时间 0.05s 的  $b$  相金属性接地故障;

故障 3: 逆变侧交流系统在 1.5s 时发生持续时间 0.1s 的  $a$  相经电阻  $R_g$  接地故障, 其中,  $R_g=450 \Omega$ 。

三种不对称故障下 HVDC 系统三相动态相量模型和电磁暂态模型的直流电压、电流和逆变侧交流电流的仿真结果对比分析分别如图 3-2-图 3-4 所示。其中,  $v_{dTPDP}$ 、 $i_{dTPDP}$ 、 $i_{aTPDP}$ 、 $i_{di}$  是本文所建的 HVDC 系统动态相量模型得到的整流侧直流电压、电流和逆变侧直流电流、交流电流;  $v_{dEMT}$ 、 $i_{dEMT}$ 、 $i_{aEMT}$  是 HVDC 系统电磁暂态模型得到的整流侧直流电压、电流和逆变侧交流电流;  $v_{dR}$ 、 $i_{dR}$  是综合文献[44]建立的 HVDC 系统换流器动态相量模型得到的 HVDC 系统动态相量模型得到的直流电压和直流电流。

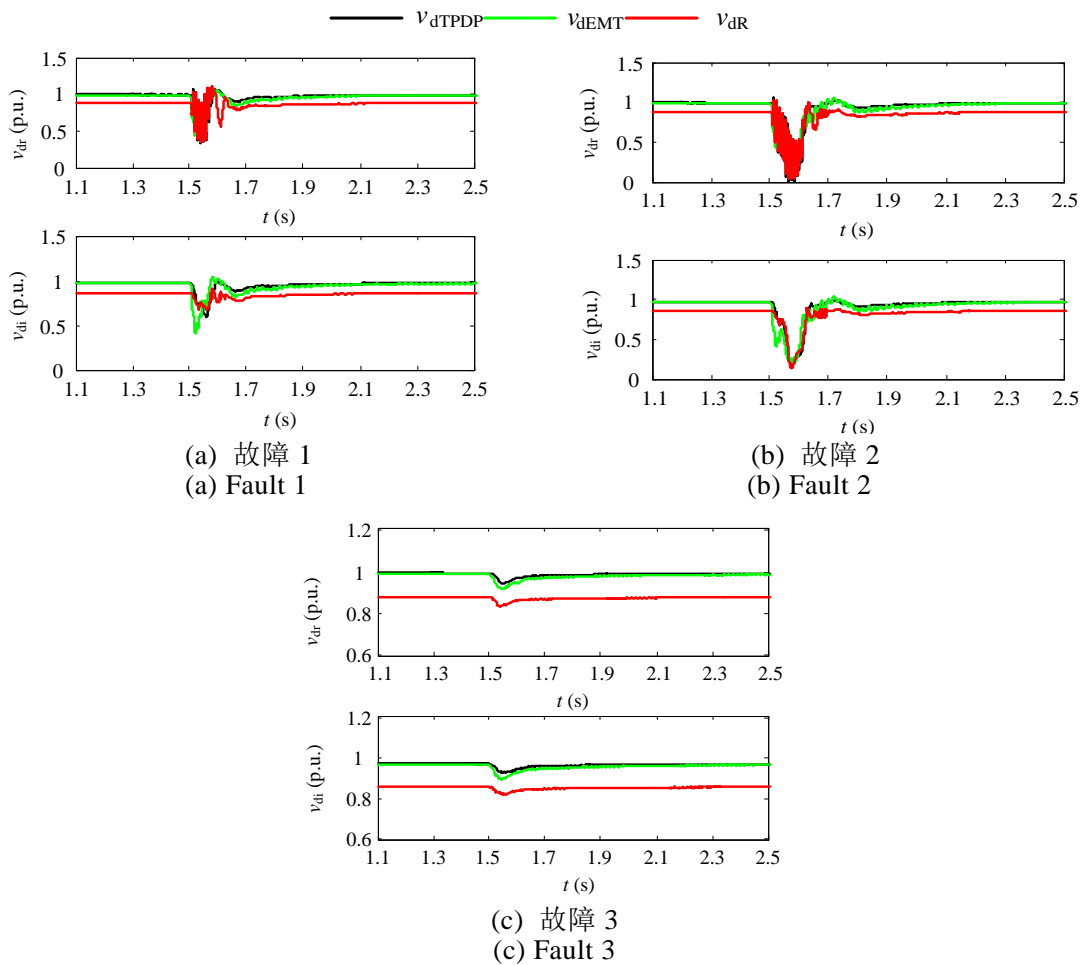


图 3-2 直流电压仿真结果

Fig. 3-2 Direct voltage simulation results

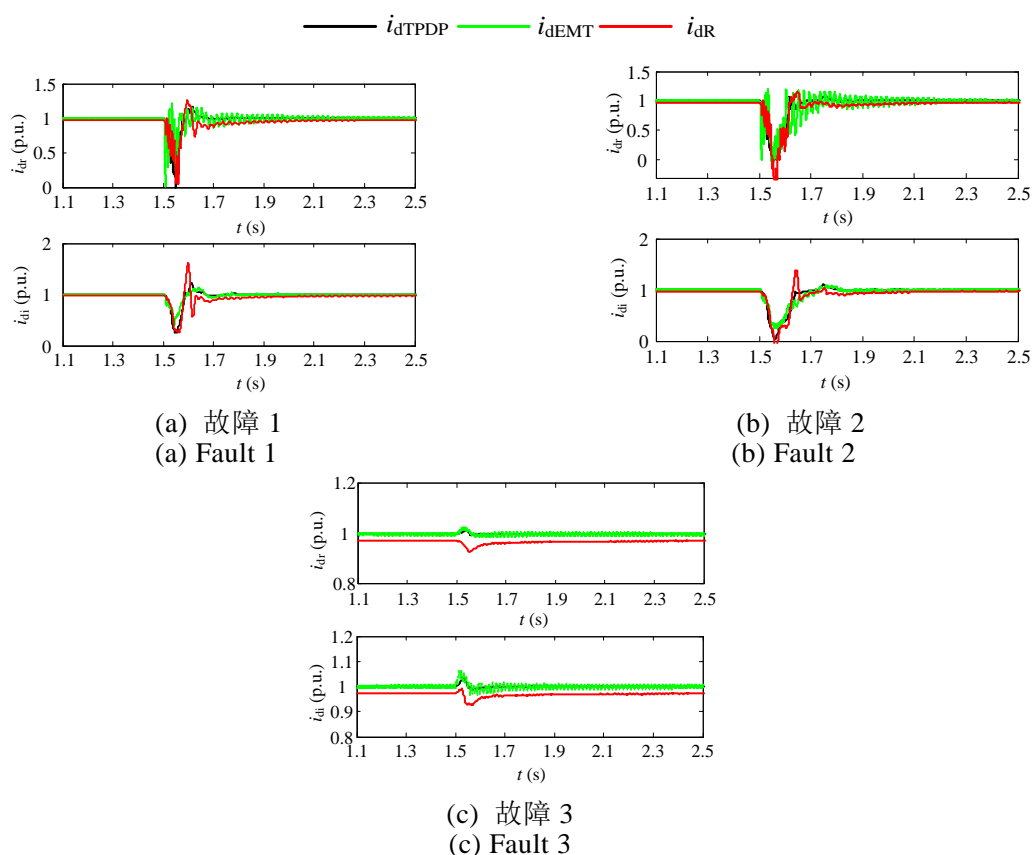


图 3-3 直流电流仿真结果对比

Fig. 3-3 Direct current simulation results

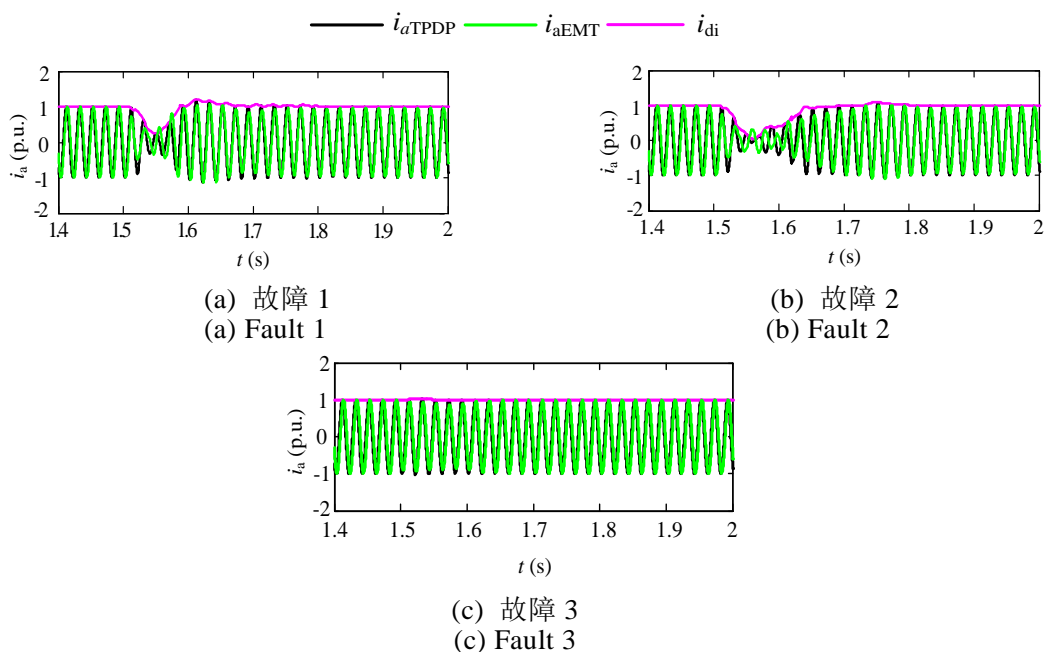


图 3-4 交流电流仿真结果

Fig. 3-4 Alternating current simulation results

图 3-2 和图 3-3 的仿真结果可以看出，所提出的 HVDC 系统三相动态相

量模型能在使用较大步长的情况下，较好地跟踪交流系统不对称故障下 HVDC 系统电磁暂态模型的动态过程，且比文献[44]建立的 HVDC 系统换流器三相动态相量模型仿真结果更接近于详细的电磁暂态模型仿真结果。因未建立交流系统的模型，因此交流电流有一定的误差。

### 3.4.3 仿真误差分析

使用残差相似度方法对所提出的 HVDC 系统三相动态相量模型仿真结果、文献[44]所提直流系统三相动态相量模型以及电磁暂态模型仿真结果进行了误差分析。残差相似度分析计算公式为<sup>[110]</sup>：

$$\begin{aligned} \gamma_i &= \frac{|y_i|}{\sum_{i=1}^N |y_i|} \\ x_i &= 1 - \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\max(|y_i|, |\hat{y}_i|)} \\ \varphi &= \sum_{i=1}^N \gamma_i x_i \end{aligned} \quad (3-20)$$

其中， $y$  和  $\hat{y}$  分别表示电磁暂态模型仿真结果和三相动态相量模型仿真结果， $x$  表示相似度， $\varphi$  表示残差相似度指标。

因为只建立了 HVDC 系统的三相动态相量模型，未建立交流系统滤波器、无功补偿设备等的动态相量模型，在此仅分析了直流电压、电流的残差相似度，残差相似度对比对象是所提出的 HVDC 系统三相动态相量模型、文献[44]的 HVDC 系统三相动态相量模型以及电磁暂态模型得到的直流电压、电流的时域值。

$t=1.4s$  到  $t=2s$  之间三种故障下直流电压、电流的残差相似度分析结果分别如表 3-1-表 3-3 所示。其中， $\Phi_1$  是本文所建模型与电磁暂态模型仿真结果之间的残差相似度， $\Phi_2$  是文献[44]所建模型与电磁暂态模型仿真结果之间的残差相似度。

表 3-1 故障 1 残差相似度  
Table 3-1 Residual similarity of fault 1

	$v_{dr}$	$v_{di}$	$i_{dr}$	$i_{di}$
$\Phi_1$	95.94%	95.81%	93.33%	96.03%
$\Phi_2$	76.60%	77.41%	75.56%	73.24%

表 3-2 故障 2 残差相似度  
Table 3-2 Residual similarity of fault 2

	$v_{dr}$	$v_{di}$	$i_{dr}$	$i_{di}$
$\Phi_1$	93.95%	94.35%	90.2%	94.99%
$\Phi_2$	73.89%	72.93%	74.39%	77.29%

表 3-3 故障 3 残差相似度

Table 3-3 Residual similarity of fault 3

	$v_{dr}$	$v_{di}$	$i_{dr}$	$i_{di}$
$\Phi_1$	98.84%	98.82%	99.56%	99.29%
$\Phi_2$	70.61%	71.47%	69.37%	69.48%

使用本文所建的 HVDC 三相动态相量模型得到的直流电压、电流的残差相似度接近于 1，且明显高于文献[44]所建模型得到的直流电压、电流的残差相似度，能较好的满足仿真的误差要求。

### 3.5 本章小结

为扩展 HVDC 动态相量模型的使用范围，本章修正了可用于分析交流系统不对称情况下的直流系统换流器三相动态相量模型，在此基础上，建立了含直流线路和控制系统动态相量模型的 HVDC 系统三相动态相量模型，并分析了 HVDC 系统三相动态相量模型的仿真过程。

在 MATLAB 中编程实现了所提 HVDC 系统三相动态相量模型仿真过程，并与文献[44]所提直流系统三相动态相量模型以及直流系统电磁暂态模型仿真结果进行了对比。对比分析表明，所提直流系统三相动态相量模型能在使用代数形式的换流器三相动态相量模型以及较大的仿真步长下，有效反应交流系统不对称故障时直流系统的动态特性，仿真精度能满足仿真需要，验证了所提动态相量模型及仿真方法的有效性和适用性。完善并扩展了 HVDC 系统动态相量模型的使用范围。

## 第4章 含电力电子装置的电力系统电磁-动态相量混合仿真

### 4.1 引言

随着 HVDC 系统以及 FACTS 原件等电力电子装置在电力系统中的广泛引用,单一的电磁暂态仿真和机电暂态仿真在电力电子化的电力系统的仿真分析中都遇到了一定限制,当需要对规模较大的系统进行仿真分析时,电磁暂态模型因为计算求解复杂的限制,需要占用大量计算资源,仿真耗时多;而机电暂态仿真随占用的计算资源少,但很难反应含电力电子装置的电力系统的全部动态特性。为弥补两种仿真方法的不总,为发挥电磁暂态仿真算法既可对电力电子装置以及交流系统的快速暂态特性和谐波特性进行详细仿真的特点,又发挥机电暂态仿真算法仿真交流系统的建模简单、占用计算资源少的特点,研究人员提出了将含电力电子装置的电力系统中的电力电子原件使用电磁暂态仿真,其余外部交流系统使用机电暂态仿真的电力系统机电-电磁暂态混合仿真算法<sup>[56-58]</sup>。当使用机电-电磁暂态混合仿真对含电力电子装置的电力系统进行仿真时,需要扩大使用电磁暂态仿真方法进行建模的电力系统的规模,从而获得较高的仿真精度。

动态相量建模方法的出现,为电力电子装置的建模仿真提供了一种仿真精度和建模复杂度介于电磁暂态建模仿真和机电暂态建模仿真的新方法。当计算资源和计算规模受到一定限制时,该建模方法为含电力电子装置的电力系统提供了能在保证仿真精度的前提下,降低计算求解规模,减少所需的计算资源的建模和混合仿真新思路。

为发挥电力电子装置动态相量模型既可根据仿真精度的需要,建立电力电子装置主要快速暂态特性和特征谐波的数学模型,仿真精度高的特点,又能将电力电子装置模型处理成代数模型,以减少建模和仿真计算的复杂度的优点,研究人员分析了在含电力电子装置的电力系统中,电力电子装置使用动态相量模型,其余外部交流系统使用机电暂态仿真的机电-动态相量混合仿真<sup>[63-64]</sup>;以及含电力电子装置的电力系统的动态相量仿真<sup>[41]</sup>。

为结合电磁暂态仿真和动态相量建模方法的优势,充分发挥电磁暂态仿真方法只需建立一套交流系统模型即可反应交流系统基波及各次谐波全部动态特性的优势;同时又有效利用动态相量理论在电力电子装置仿真建模中在保证仿真精度的前提下,可以减少建模和仿真计算的复杂度的优点;为较大的含电力电子装

置的电力系统需要较高精度仿真，但计算机求解资源又受到一定限制时，提供一种具有良好仿真精度，同时需要的计算资源较少，求解较简单的仿真方法，本章提出了含电力电子装置的电力系统的电磁-动态相量混合仿真方法。其中，电力电子装置使用动态相量模型，交流系统使用电磁暂态模型。

本章首先介绍了电磁暂态仿真的基本理论和方法，然后根据电磁暂态仿真和动态相量建模仿真方法的优点与原理介绍了交流系统使用电磁暂态模型，电力电子装置使用动态相量模型的含电力电子装置的电力系统的电磁-动态相量混合仿真，随后以交直流系统为例，根据交直流系统相互关系的特点，详细分析了交直流系统电磁-动态相量混合仿真中交直流系统的分区、相互等效方法以及混合仿真算法的实现方法。在 MATLAB 中编程实现了提出的交直流系统电磁-动态相量混合仿真。将混合仿真结果与 PSCAD/EMTDC 中的交直流系统电磁暂态模型仿真结果进行了对比，验证了所提出的交直流系统电磁-动态相量混合仿真的可行性和有效性。

## 4.2 电磁暂态仿真实论

### 4.2.1 电感电容元件的电磁暂态模型

#### 4.2.1.1 电感元件的电磁暂态模型

隐式梯形积分法因计算较简单，计算精度和数值稳定性良好，对刚性微分方程有较好的实用性等特点，被 EMTP 和 EMTDC/PSCAD 等大多数电磁暂态仿真程序做为基本数值求解方法。

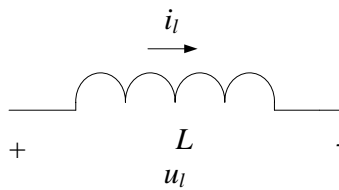


图 4-1 电感元件电路

Fig. 4-1 Circuit of inductance

如图 4-1 所示的电感电路的时域微分动态方程为：

$$L \frac{di_l}{dt} = u_l \quad (4-1)$$

设积分步长为  $\Delta t$ ，应用隐式梯形积分公式，将式(4-1)转化为差分方程得：

$$i_l(t + \Delta t) - i_l(t) = \frac{\Delta t}{2L} [u_l(t + \Delta t) + u_l(t)] \quad (4-2)$$

根据式(4-2)，可得到电感元件时域上的电压电流友模方程为：

$$i_l(t + \Delta t) = \frac{1}{R_l} u_l(t + \Delta t) + I_l(t) \quad (4-3)$$

$$I_l(t) = \frac{1}{R_l} u_l(t) + i_l(t)$$

其中,

$$R_l = \frac{2L}{\Delta t}$$

其中,  $R_l$  为电磁暂态计算中电感的等值电阻, 当积分步长  $\Delta t$  确定后为定值;  $I_l(t)$  为  $t + \Delta t$  时刻电感的等值电流源。

对应的  $t + \Delta t$  时刻电感电磁暂态等值计算电路如图 4-2 所示。

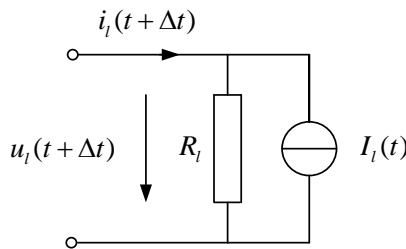


图 4-2 电感元件电磁暂态等值计算电路

Fig. 4-2 Electromagnetic transient equivalent circuit of inductance

#### 4.2.1.2 电容元件的电磁暂态模型

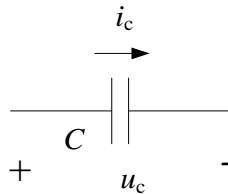


图 4-3 电容元件电路

Fig. 4-3 Circuit of capacity

如图 4-3 所示的电容电路的时域微分动态方程为:

$$C \frac{du_c}{dt} = i_c \quad (4-4)$$

设积分步长为  $\Delta t$ , 应用隐式梯形积分公式, 将式(4-4)转化为差分方程得:

$$u_c(t + \Delta t) - u_c(t) = \frac{\Delta t}{2C} [i_c(t + \Delta t) + i_c(t)] \quad (4-5)$$

根据式(4-5), 可得到电容元件时域上的电压电流友模方程为:

$$\begin{aligned}
 i_c(t+\Delta t) &= \frac{1}{R_c} u_c(t+\Delta t) + I_c(t) \\
 I_c(t) &= -\frac{1}{R_c} u_c(t) - i_c(t)
 \end{aligned}
 \tag{4-6}$$

其中,

$$R_c = \frac{\Delta t}{2C}$$

其中,  $R_c$  为电磁暂态计算中电容的等值电阻, 当积分步长  $\Delta t$  确定后为定值;  $I_c(t)$  为  $t+\Delta t$  时刻电容的等值电流源。

对应的  $t+\Delta t$  时刻电容电磁暂态等值计算电路如图 4-4 所示。

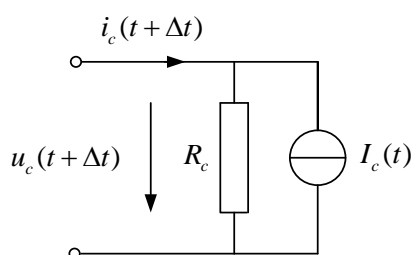


图 4-4 电容元件电磁暂态等值计算电路

Fig. 4-4 Electromagnetic transient equivalent circuit of capacity

#### 4.2.2 电磁暂态仿真的基本流程

前面介绍了电力系统中的电感器、电容器等集中参数元件在  $t+\Delta t$  时刻的电磁暂态等值计算电路模型, 该模型表示了  $t+\Delta t$  时刻的电压、电流值和  $t$  时刻的电压、电流值间的关系。其中,  $t$  时刻的电压、电流对  $t+\Delta t$  是已知量。

对于变压器、短线路等可近似处理成集中参数元件的元件, 同样可列写描述其暂态过程的电压和电流之间的常微分方程, 然后应用隐式梯形积分法求解, 列写其电磁暂态等值计算电路模型。对长线路等分布式参数元件列写描述其暂态过程的电压和电流之间的偏微分方程, 并根据偏微分方程的解析解可构造出相应的电磁暂态等值计算电路; 对于有损线路可做适当近似处理后构造相应的电磁暂态等值计算电路。

把电力系统各元件  $t+\Delta t$  时刻的电磁暂态等值计算电路按照电网中的实际接线情况连接后, 便可形成一个由纯电阻和电流源组成的网络, 称为  $t+\Delta t$  时刻的等值计算网络, 简称为等值计算网络。当  $t+\Delta t$  时刻的外施电源和各等值电流源均已知时, 求解等值计算网络, 即可得到该时刻各元件的电压值和电流值。然后, 根据所得结果即可得出下一时刻各等值电流源的值, 通过求解相应的等值计算网络, 便可得到下一时刻各元件的电压值和电流值, 进而得到各时刻各元件的电压、

电流值。

电磁暂态仿真的基本流程为：

步骤 1、列写等值计算网络的节点电压方程：

$$Gu(t+\Delta t) = I(t) \quad (4-7)$$

其中,  $G$  为等值计算网络的节点电导矩阵,  $u(t+\Delta t)$  为  $t+\Delta t$  时刻各节点的电压值,  $I(t)$  为根据  $t+\Delta t$  时刻的外施电流源和  $t$  时刻电压值和电流值计算得到的等值电流源构成的各节点注入电流。

步骤 2、根据式(4-7)计算得到  $u(t+\Delta t)$ ；

步骤 3、利用等值计算网络计算得到  $t+\Delta t$  时刻各支路电流值  $i(t+\Delta t)$ ；

步骤 4、令  $t=t+\Delta t$ ，返回步骤 1 进行循环计算。

## 4.3 电磁-动态相量混合仿真方法

### 4.3.1 模型区域划分及相互等效方法

进行混合仿真时, 需要把含电力电子装置的电力系统划分为两个子系统。其中, 一个子系统为电力电子装置, 使用动态相量模型进行建模仿真, 在保证仿真精度的前提下减少建模的复杂度和计算量, 称为子系统一; 另一个子系统为外部的交流系统, 使用电磁暂态模型进行建模仿真, 称为子系统二。选取电力电子装置接入系统处的母线做为两种模型的接口母线, 模型区域划分示意图如图 4-5 所示。

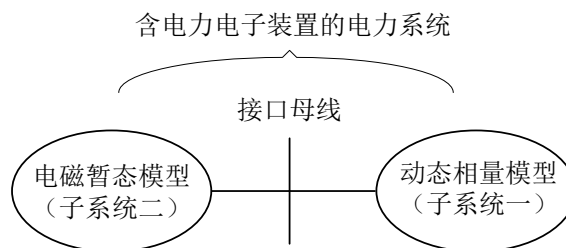


图 4-5 混合仿真区域划分示意图

Fig. 4-5 Schematic diagram of hybrid simulation region division

混合仿真中, 子系统一和子系统二分别使用动态相量模型和电磁暂态模型两种模型进行建模仿真, 在电力系统电磁暂态模型中, 系统的电压、电流等变量使用时域瞬时值模型表示; 电力电子装置的动态相量模型中, 系统的电压、电流等变量使用动态相量模型表示。因此, 需要把两个子系统在模型的接口母线处进行相互等效以及数据的相互转换, 并分别仿真。

两个子系统间的相互等效作用如图 4-6 表示。其中, 对于使用电磁暂态模

型进行仿真的子系统二而言,子系统一可在接口母线处等效为注入电流源来表示对子系统二的影响;对于使用动态相量模型进行仿真的子系统一而言,可把子系统二在接口母线处等效为电压源来表示对子系统一的影响。子系统二的时域值与子系统一的动态相量值可按照本文中动态相量值与时域值的相互转换关系进行相互转换。

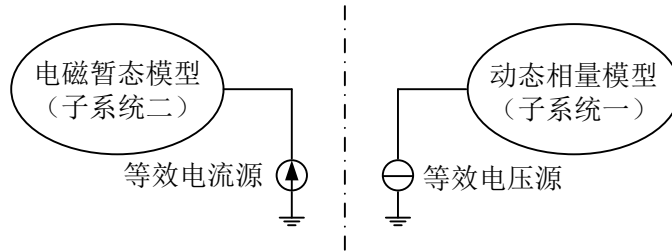


图 4-6 模型相互等效作用示意图

Fig. 4-6 Schematic diagram of the interaction between two models

### 4.3.2 混合仿真流程

以图 2-6 所示的含单极 12 脉动直流系统的交直流系统电磁-动态相量混合仿真为例,来说明电磁-动态相量混合仿真的主要流程。混合仿真中,选取整流侧以及逆变侧换流母线作为电磁-动态相量混合仿真模型的接口母线;交流系统在接口母线处对直流系统等效为电压源,直流系统在接口母线处对交流系统等效为电流源。

交直流系统电磁-动态相量混合仿真流程为:首先根据交直流系统分区情况建立交流系统电磁暂态计算网络,并将直流线路的动态相量模型、控制器模型以及锁相环(Phase Locked Loop, PLL)模型<sup>[111]</sup>差分化,再将交流系统电磁暂态模型、差分后的直流线路动态相量模型和控制器模型、PLL 模型以及换流器动态相量模型配合进行仿真,混合仿真流程图如图 4-7 所示。

混合仿真具体流程如下:

步骤 1、以整流侧和逆变侧的换流母线为边界,根据交流系统各元件连接方式及直流系统位置形成交流系统电磁暂态计算网络的节点方程:

$$Gu_{ac}(t+\Delta t) = i_{\text{history}}(t) \quad (4-8)$$

其中,  $G$  为电磁暂态计算节点导纳矩阵,  $u_{ac}(t+\Delta t)$  为  $t+\Delta t$  时刻交流系统各节点瞬时电压组成的列相量,  $i_{\text{history}}(t)$  为由  $t+\Delta t$  时刻外施电流源、 $t$  时刻交流系统各节点电压值  $u_{ac}(t)$ 、各支路电流值  $i_{ac}(t)$  计算得到的交流系统历史电流列相量  $i_{\text{historyac}}(t)$  以及两侧换流母线注入直流系统的电流时域值  $i_r(t)$ 、 $i_i(t)$  组成的历史电流列相量。混合仿真中的初值根据潮流计算结果设定。

步骤 2、根据式(4-8)计算得到  $t+\Delta t$  时刻各节点的瞬时电压值  $u_{ac}(t+\Delta t)$ ;

步骤 3、根据等值计算网络计算得到  $t + \Delta t$  时刻交流系统各支路的电流值  $i_{ac}(t + \Delta t)$ ;

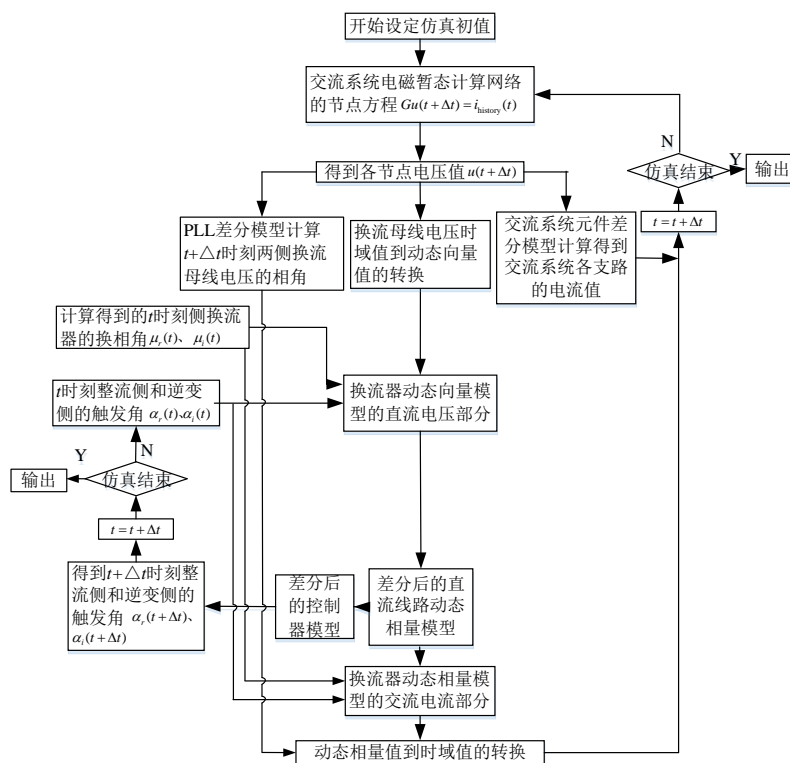


图 4-7 交直流系统电磁-动态相量混合仿真流程图

Fig. 4-7 Flow chart of AC-DC system electromagnetic – dynamic phasors hybrid simulation

步骤 4、根据  $t$  时刻和  $t + \Delta t$  时刻两侧换流母线的电压值和  $t$  时刻换流母线  $a$  相电压相角，由  $PLL$  差分模型计算  $t + \Delta t$  时刻两侧换流母线  $a$  相电压的相角；

步骤 5、通过时域值向动态相量转换的公式(2-16)计算得到  $t + \Delta t$  时刻的两侧换流母线  $a$  相电压的动态相量值。

步骤 6、根据  $t + \Delta t$  时刻两侧换流母线  $a$  相电压的动态相量值、控制器输出的  $\alpha_r(t)$ 、 $\alpha_i(t)$  以及由式(2-38)计算得到的两侧换流器的换相角  $\mu_r(t)$ 、 $\mu_i(t)$ ，通过整流器和逆变器动态相量模型的直流电压部分计算得到  $t + \Delta t$  时刻直流侧直流电压动态相量值  $\langle v_{dr,12p} \rangle_0(t + \Delta t)$ 、 $\langle v_{di,12p} \rangle_0(t + \Delta t)$ 。

步骤 7、根据  $t + \Delta t$  时刻直流侧直流电压动态相量值  $\langle v_{dr,12p} \rangle_0(t + \Delta t)$ 、 $\langle v_{di,12p} \rangle_0(t + \Delta t)$ ， $t$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{dr,12p} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{di,12p} \rangle_0(t)$ 、 $\langle v_{dc,12p} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t)$ ，通过差分后的直流线路动态相量模型计算得到  $t + \Delta t$  时刻直流电压动态相量  $\langle v_{dc,12p} \rangle_0(t + \Delta t)$  以及直流侧直流电流动态相

量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t+\Delta t)$ 。

步骤 8、根据  $t+\Delta t$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量  $\langle v_{dr,12p} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle v_{dc,12p} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle v_{di,12p} \rangle_0(t+\Delta t)$  和  $\langle i_{dr} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle i_{dc} \rangle_0(t+\Delta t)$  以及动态相量与时域值转换公式计算得到  $t+\Delta t$  时刻直流侧直流电压、电流的时域值  $v_{dr,12p}(t+\Delta t)$ 、 $v_{dc,12p}(t+\Delta t)$ 、 $v_{di,12p}(t+\Delta t)$  和  $i_{dr}(t+\Delta t)$ 、 $i_{dc}(t+\Delta t)$ 、 $i_{di}(t+\Delta t)$ 。

步骤 9、根据  $t+\Delta t$  时刻直流侧直流电流动态相量值  $\langle i_{dr} \rangle_0(t+\Delta t)$  和  $\langle i_{di} \rangle_0(t+\Delta t)$ ， $t$  时刻整流侧和逆变侧触发角  $\alpha_r(t)$ 、 $\alpha_i(t)$ ，换相角  $\mu_r(t)$ 、 $\mu_i(t)$  以及  $t+\Delta t$  时刻的  $\theta_{ra}(t+\Delta t)$ 、 $\theta_{ia}(t+\Delta t)$  和整流侧、逆变侧换流母线  $a$  相电压的初相位，由整流器和逆变器动态相量模型的交流电流部分以及交流电流的动态相量值到时域值的转换关系计算得到  $t+\Delta t$  时刻两侧换流母线注入直流系统的电流值。

步骤 10、根据  $t+\Delta t$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{di,12p} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_0(t+\Delta t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t+\Delta t)$  以及  $t$  时刻直流侧直流电压、电流动态相量值  $\langle v_{di,12p} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{dr} \rangle_0(t)$ 、 $\langle i_{di} \rangle_0(t)$ ，由控制器差分模型计算得到  $t+\Delta t$  时刻整流侧和逆变侧的触发角  $\alpha_r(t+\Delta t)$ 、 $\alpha_i(t+\Delta t)$ 。

步骤 11、令  $t=t+\Delta t$ ，检测是否为仿真结束时刻  $t_{end}$ ，如果是，则仿真结束；如果不是，返回步骤 1 循环。

## 4.4 仿真分析

### 4.4.1 仿真测试系统

仿真测试系统为图 2-6 的单极 12 脉动 HVDC 系统。控制系统整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定电压控制，同时整流侧和逆变侧均配有低压限流控制。应用推导的能反应直流系统换流器谐波特性的单极 12 脉动 HVDC 系统动态相量模型以及所提交直流系统电磁-动态相量混合仿真方法，使用 Matlab 编程实现了测试系统的电磁-动态相量混合仿真；并在电磁暂态仿真程序 PSCAD/EMTDC 中搭建了相应的电磁暂态模型。其中，动态相量模型仿真步长为  $100\mu s$ ，电磁暂态模型仿真步长为  $50\mu s$ 。

### 4.4.2 仿真结果

使用所建混合仿真模型与 PSCAD/EMTDC 中的电磁暂态模型在下列 2 种扰动算例下进行了仿真对比分析。

算例 1: HVDC 系统电流参考值  $I_{dr\text{ref}}$  在  $t=2\text{s}$  时从 1 变化到 0.6;

算例 2: 整流侧交流电源电压幅值在  $t=2\text{s}$  时跌落 5%; 这类故障一般是由远方系统发生故障引起的<sup>[41]</sup>。

两种扰动下电磁-动态相量混合仿真和电磁暂态仿真所得的直流系统整流侧电流以及整流侧换流母线  $a$  相交流电压、整流侧换流母线流向直流系统的  $a$  相交流电流分别如图 4-8-图 4-10 所示。其中,  $i_{dr\text{Hybrid}}$ 、 $v_{ra\text{Hybrid}}$ 、 $i_{ra\text{Hybrid}}$  是所提交直流系统电磁-动态相量混合仿真得到的直流系统电流以及交流系统电压、电流;  $i_{dr\text{EMT}}$ 、 $v_{ra\text{EMT}}$ 、 $i_{ra\text{EMT}}$  是电磁暂态仿真得到的直流系统电流以及交流系统电压、电流。

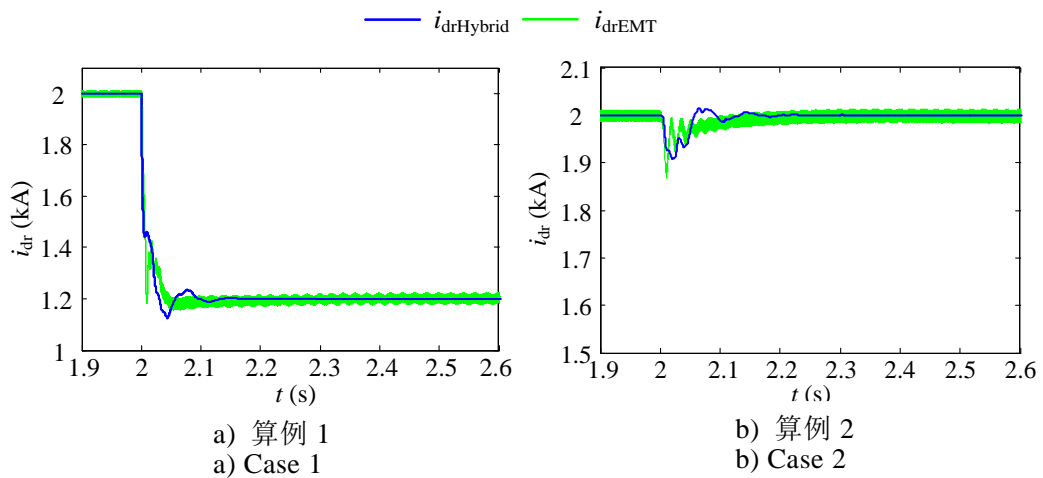


图 4-8 直流电流仿真结果

Fig. 4-8 Direct current simulation results

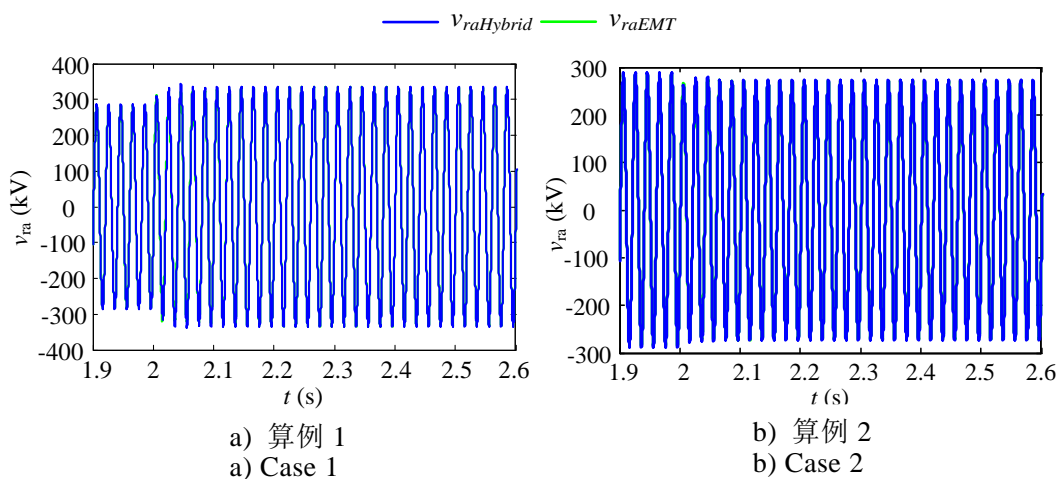


图 4-9 整流侧换流母线电压仿真结果

Fig. 4-9 Simulation results of commutation bus voltage in rectifier side

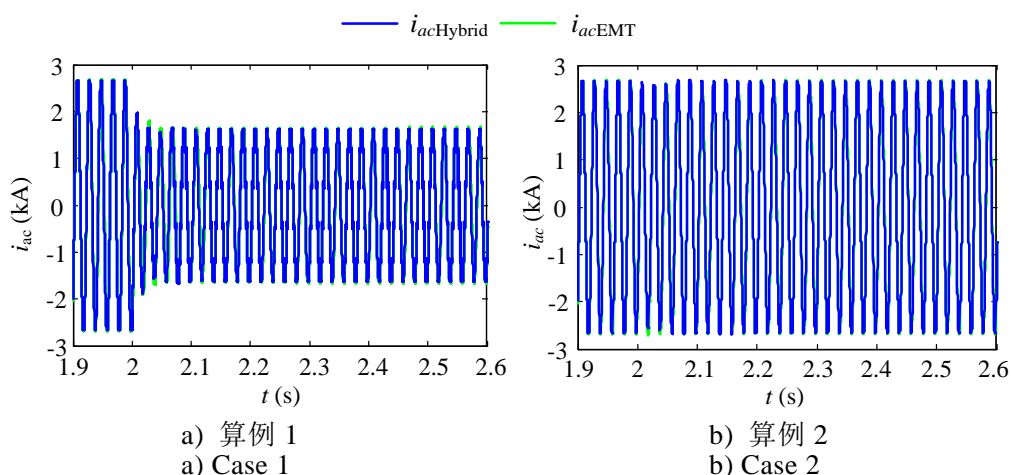


图 4-10 整流侧换流母线流向直流系统电流仿真结果

Fig. 4-10 Simulation results of alternating current from commutation bus to DC system in rectifier side

对比的仿真结果中，电磁-动态相量混合仿真中仿真步长为  $100 \mu\text{s}$ ，电磁暂态模型仿真步长为  $50 \mu\text{s}$ 。从图 4-8-图 4-10 的仿真结果可以看出，交直流系统电磁-动态相量混合仿真在较大的仿真情况下，能很好的反应直流系统和交流系统扰动下，包含直流系统换流器对交流系统的谐波特性在内的交直流系统的动态特性。

因为在不同平台建立了电磁暂态模型和混合仿真模型，不能直接对比仿真速度，但混合仿真中仿真步长比电磁暂态仿真步长大，而且动态相量建模方法通过代数方程即可建立能反映换流器频率特性的换流器模型，与电磁暂态计算方法相比，能有效降低计算求解规模。同时文献[44]对动态相量仿真方法能有效较少仿真时间进行了详细分析。因此可知交直流系统电磁动态相量混合仿真在有效反映交直流系统动态特性的同时能有效提高仿真速度。

## 4.5 本章小结

为发挥电磁暂态建模仿真方法以及动态相量建模仿真方法各自的优势，为含电力电子装置的电力系统提供了在保证仿真精度的前提下，有效减少建模求解复杂度，降低计算求解规模的混合仿真方法，本章提出了含电力电子装置的电力系统中，交流系统使用电磁暂态模型，电力电子器件使用动态相量模型的电磁-动态相量混合仿真方法，分析了混合仿真中模型区域划分时接口母线位置、模型相互等效方法，并以含单极 12 脉动直流系统的交直流系统电磁-动态相量混合仿真为例分析了混合仿真的具体流程。

在 MATLAB 中编程实现了交直流系统的电磁-动态相量混合仿真，并与电磁暂态模型仿真结果进行了对比。对比分析表明，所提出的混合仿真能在交流系统

使用电磁暂态模型，直流系统使用比电磁暂态模型简单易求解的动态相量模型，以及较大仿真步长情况下，在不同的交直流系统扰动下，有效反映交直流系统的动态过程，具有良好的仿真精度，验证了混合仿真的正确性和有效性。

## 第5章 基于自适应动态面控制的高压直流系统广域紧急功率支援控制策略

### 5.1 引言

HVDC 系统因在远距离大容量输电中的优势在我国电力系统中得到广泛应用,并使我国出现了如南方电网等交直流并列运行的电力系统。在这些交直流并列运行的电力系统中,利用直流系统输送功率快速可调的特点可制定合理的经济、有效的直流系统紧急功率支援控制策略,来提高交直流并列运行系统的暂态稳定性。目前, HVDC 系统紧急功率支援控制策略分为在线式和离线式两种。随着 WAMS 系统的广泛使用以及鲁棒控制策略的发展,使用鲁棒控制策略,利用 WAMS 系统提供的系统信息制定 HVDC 系统紧急功率支援控制策略成为在线式紧急功率支援控制策略制定的重要研究方向。

动态面控制策略作为一种具有控制规律较简单,鲁棒性强,控制效果良好等特点的鲁棒控制策略,受到国内外研究人员广泛重视<sup>[112-114]</sup>。但是,传统的动态面控制策略不易处理系统的未知参数、未知建模误差和外界干扰等问题<sup>[85-86]</sup>。为设计鲁棒性强、控制效果良好,并且控制规律简单的 HVDC 系统紧急功率支援控制策略,本章使用 WAMS 系统提供的系统信息,结合动态面控制策略和自适应控制理论设计了能处理系统未知参数、未知建模误差和外界干扰等未知误差的 HVDC 系统广域紧急功率支援控制策略。

本章首先介绍了基于 COI 理论的交直流系统并列运行的两区域系统的等值模型,随后使用动态面控制策略和自适应控制理论设计了 HVDC 系统广域紧急功率支援控制策略,并使用能量函数法理论证明了所提控制策略下交直流系统的稳定性。在 PSCAD/EMTDC 中搭建的四机两区域交直流混联系统上,使用所提的 HVDC 系统广域紧急功率支援控制策略与基于零极点配置技术设计的 HVDC 系统紧急功率支援控制策略和基于反步法设计的 HVDC 系统紧急功率支援控制策略进行了仿真对比分析,验证了所提控制策略的有效性。

### 5.2 基于 COI 理论的两区域交直流系统模型建模

#### 5.2.1 COI 理论

现代电力系统经过 100 多年的发展,已成为多发电机同时运行,交直流系统

并列，负荷种类多样的多阶复杂大系统。系统的复杂性，为系统的稳定分析与控制带来了挑战。COI 理论的出现为电力系统的稳定分析与控制提供了可靠的等值方法，通过加权平均的方法可将同群复杂机组等值为单机组，为电力系统的稳定分析提供了可靠且容易分析的系统等值模型。

COI 理论中，同群机组的 COI 等值转子角  $\delta_{COI}$  被定义为群内各发电机的转子角  $\delta_i$  的加权平均值。其中，权系数为各发电机的惯性系数  $H_i$ ，表示为<sup>[48]</sup>：

$$\delta_{COI} = \frac{1}{H_T} \sum_{i=1}^n H_i \delta_i \quad (5-1)$$

其中， $H_T$  是 COI 等值惯性系数； $\delta_i$ 、 $\delta_{COI}$  和  $H_i$ 、 $H_T$  均为有名值，单位分别为  $rad$  和  $s$ ； $H_T$  表示为：

$$H_T = \sum_{i=1}^n H_i \quad (5-2)$$

与 COI 等值转子角  $\delta_{COI}$  相似，同群机组的 COI 等值电角速度为：

$$\omega_{COI} = \frac{1}{H_T} \sum_{i=1}^n H_i \omega_i \quad (5-3)$$

其中， $\omega_i$  表示群内第  $i$  台发电机的电角速度， $\omega_i$  和  $\omega_{COI}$  均为标么值。

根据 COI 理论，同群发电机组的 COI 二阶运动方程为：

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_{COI}}{dt} &= (\omega_{COI} - 1)\omega_0 \\ 2H_T \frac{d\omega_{COI}}{dt} &= \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}) - \sum_{i=1}^n D_i (\omega_i - 1) \end{aligned} \quad (5-4)$$

其中， $P_{mi}$ 、 $P_{ei}$  和  $D_i$  分别表示第  $i$  台原动机的输入机械功率和对应的发电机的输出的电磁功率以及阻尼系数，均为标么值。

### 5.2.2 两区域交直流系统 COI 模型

两区域交直流并列运行的电力系统由并列运行的交直流线路分成区域 A 和区域 B 两个区域，其结构图如图 5-1 所示。其中，区域 A 和区域 B 分别表示送端地区和受端地区。

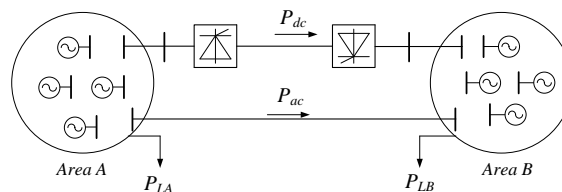


图 5-1 两区域交直流系统结构图

Fig. 5-1 Sketch of the AC/DC interconnected two-area power system

根据 COI 等值方法，区域 A 和 B 的 COI 等值发电机的电角速度， $\omega_{COI,A}$  和  $\omega_{COI,B}$ ，可表示为：

$$\begin{cases} \omega_{COI,A} = \sum_{i \in A}^{n_A} H_i \omega_i / H_{T,A} \\ \omega_{COI,B} = \sum_{i \in B}^{n_B} H_i \omega_i / H_{T,B} \end{cases} \quad (5-5)$$

其中， $\omega_i$  表示第  $i$  台发电机的角速度，为标么值； $H_i$  表示第  $i$  台发电机的惯性系数，单位为 s； $H_{T,A}$  和  $H_{T,B}$  分别表示区域 A 和 B 的 COI 等值惯性系数，由(5-6)式计算得到：

$$\begin{cases} H_{T,A} = \sum_{i \in A}^{n_A} H_i \\ H_{T,B} = \sum_{i \in B}^{n_B} H_i \end{cases} \quad (5-6)$$

区域 A 和 B 的惯量中心等值发电机的动态方程为：

$$\begin{cases} 2H_{T,A} \dot{\omega}_{COI,A} = \sum_{i \in A} (P_{mi} - P_{ei}) - \sum_{i \in A} D_i (\omega_i - 1) \\ 2H_{T,B} \dot{\omega}_{COI,B} = \sum_{i \in B} (P_{mi} - P_{ei}) - \sum_{i \in B} D_i (\omega_i - 1) \end{cases} \quad (5-7)$$

其中， $P_{mi}$ ,  $P_{ei}$  和  $D_i$  分别表示第  $i$  台原动机的输入机械功率和对应的发电机的输出的电磁功率以及阻尼系数； $H_{T,A}$  和  $H_{T,B}$  为有名值，其单位为 s，其余变量均采用标么值。

根据功率守恒原则，区域 A 和 B 的有功潮流方程为：

$$\begin{cases} \sum_{i \in A} P_{ei} = P_{LA} + P_{dc} + P_{ac} \\ \sum_{i \in B} P_{ei} = P_{LB} - P_{dc} - P_{ac} \end{cases} \quad (5-8)$$

其中， $P_{LA}$ ,  $P_{LB}$  分别表示区域 A 和 B 的负荷以及网损的总和， $P_{dc}$  和  $P_{ac}$  分别表示直流系统及与其并列运行的交流线路传输的有功功率。

在研究两区域交直流系统稳定控制策略时，因为直流系统功率的快速可调性，直流系统可用下列一阶惯性环节表示<sup>[115-116]</sup>：

$$\dot{P}_{dc} = \frac{1}{T_d} (-P_{dc} + P_{dcREF} + u_{dc}) \quad (5-9)$$

其中， $P_{dcREF}$  表示直流系统的功率参考值， $T_d$  表示直流系统的等值时间常数， $u_{dc}$  是直流系统紧急功率支援控制的功率信号。本文中选取  $T_d=0.2s$ 。

以区域 B 的 COI 等值速度为参考值，考虑系统的未知建模误差以及外界干扰，两区域交直流混联系统的 COI 等值数学模型可表示为：

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{COI,A} - \dot{\omega}_{COI,B} = \frac{\sum_{i \in A} (P_{mi} - P_{ei})}{2H_{T,A}} - \frac{\sum_{i \in B} (P_{mi} - P_{ei})}{2H_{T,B}} \\ + \tilde{D}_{COI}(\omega_{COI,A} - \omega_{COI,B}) + e_R + e_G \\ \dot{P}_{dc} = \frac{1}{T_d} (-P_{dc} + P_{dcREF} + u_{dc}) + e_D \end{cases} \quad (5-10)$$

其中,

$$\begin{aligned} & \tilde{D}_{COI}(\omega_{COI,A} - \omega_{COI,B}) + e_R \\ &= -\frac{1}{2H_{T,A}} \sum_{i \in A} D_i(\omega_i - 1) + \frac{1}{2H_{T,B}} \sum_{i \in B} D_i(\omega_i - 1) \end{aligned}$$

$\tilde{D}_{COI}$  表示两区域交直流混联系统的 COI 等值阻尼系数;  $e_R$  表示等值阻尼系统的建模误差;  $e_G$  表示 COI 等值模型的建模误差以及外界干扰;  $e_D$  表示直流系统的建模误差及外界干扰。因为这四个参数均不可测, 因此此四个参数均为未知参数。

## 5.3 控制策略的设计和稳定性证明

### 5.3.1 两区域交直流系统的状态空间方程

为设计直流系统紧急功率支援控制策略, 首先需要建立两区域交直流混联系统的状态空间方程。紧急功率支援控制策略的控制目标是两区域的等值电角速度为零, 即:

$$\omega_{COI,A} - \omega_{COI,B} = 0 \quad (5-11)$$

定义两区域交直流混联系统的状态空间方程的两个状态变量  $x_1$  和  $x_2$ 。其中,  $x_1$  表示区域 A 和 B 的 COI 等值角速度的差;  $x_2$  为  $x_1$  的导数; 并定义状态空间方程的输出变量  $y$ ;  $x_1$ 、 $x_2$  和  $y$  分别为:

$$\begin{aligned} x_1 &= \omega_{COI,A} - \omega_{COI,B} \\ x_2 &= \dot{\omega}_{COI,A} - \dot{\omega}_{COI,B} \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (5-12)$$

将两区域交直流混联系统的状态空间方程按照动态面控制和自适应控制的设计要求进行标准化, 其标准化形式为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = v + \theta^* x_2 + \Delta(t) \end{cases} \quad (5-13)$$

其中,

$$v = \frac{\sum_{i \in A} \dot{P}_{mi} - \dot{P}_{LA} - \dot{P}_{ac}}{2H_{T,A}} - \frac{\sum_i \dot{P}_{mi} - \dot{P}_{LB} + \dot{P}_{ac}}{2H_{T,B}},$$

$$- \frac{(H_{T,B} + H_{T,A})}{2H_{T,A}H_{T,B}} \left[ \frac{1}{T_d} (-P_{dc} + P_{deREF} + u_{dc}) \right]$$

$$\theta^* = \tilde{D}_{COI},$$

$$\Delta(t) = - \frac{(H_{T,B} + H_{T,A})}{2H_{T,A}H_{T,B}} e_D + \dot{e}_R + \dot{e}_G.$$

其中,  $v$  和  $u_{dc}$  分别表示系统的虚拟控制变量和实际控制变量;  $\theta^*$  是一个未知参数, 用来表示 COI 等值阻尼系数  $\tilde{D}_{cor}$ ;  $\Delta(t)$  用来表示系统的综合建模误差和外界干扰,  $\Delta(t)$  满足  $|\Delta(t)| \leq \psi^*$ , 其中  $\psi^*$  是一个未知参数。

### 5.3.2 控制策略的设计

传统的动态面控制策略不包含未知参数的控制部分。为了在充分利用动态面控制的同时, 又能有效处理系统中的未知参数。本章将一种基于确定等值理论<sup>[117]</sup>和一类  $\sigma$ -修正<sup>[118]</sup>的自适应控制与动态面控制相结合设计了使用自适应动态面控制的直流系统广域紧急控制策略。控制策略的设计过程如图 5-2 所示, 具体设计步骤如下:

首先, 根据动态面控制策略进行坐标如下的坐标变换<sup>[85]</sup>:

$$\begin{cases} S_1 := x_1 \\ S_2 := x_2 - x_{2d} \end{cases} \quad (5-14)$$

之后根据动态面控制的设计步骤, 定义一个中间虚拟变量  $x_e$ 。如式(5-15)所示,  $x_e$  经过一阶滤波器得到  $x_{2d}$ , 通过引入一阶滤波器, 根据动态面控制设计的控制法则将比根据反步法控制设计的控制法则简单。

$$\tau \dot{x}_{2d} + x_{2d} = x_e, \quad x_{2d}(0) = x_e(0) \quad (5-15)$$

其中,  $\tau$  是一阶滤波器的设计时间常数。

为了设计中间虚拟变量  $x_e$ , 设计如下第一个二次型方程:

$$V_1 = \frac{1}{2} S_1^2 \quad (5-16)$$

为了进行控制规律设计以及控制规律的稳定性分析, 定义如下滤波误差  $y_2$ :

$$y_2 = x_{2d} - x_e \quad (5-17)$$

根据式(5-13)-(5-17),  $V_1$  的时间导数可表示为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= S_1 \dot{S}_1 = S_1 x_2 = S_1 (S_2 + y_2 + x_e) \\ &\leq S_1 x_e + 2S_1^2 + \frac{1}{4} S_2^2 + \frac{1}{4} y_2^2 \end{aligned} \quad (5-18)$$

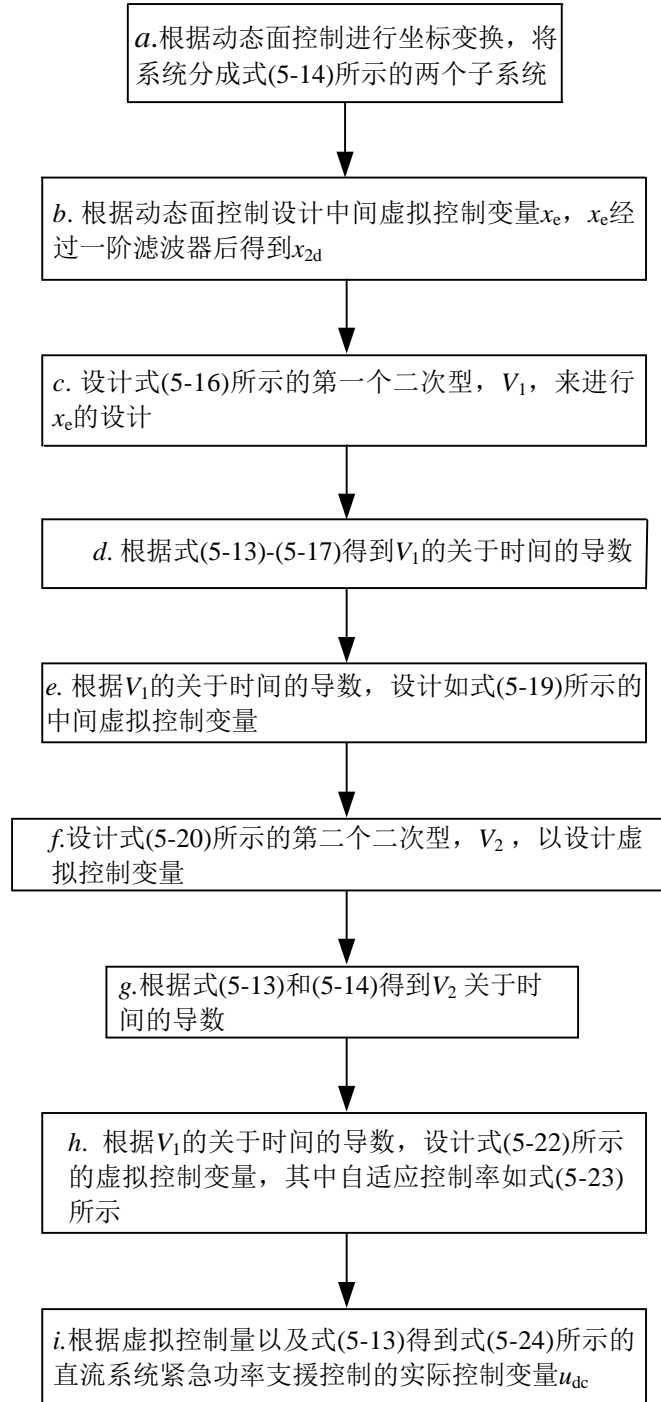


图 5 - 2 控制规律设计流程图

Fig. 5-2 Flow chart of control strategy design

根据  $V_1$  的时间导数，结合动态面控制策略，设计中间虚拟变量为：

$$x_e = -K_1 S_1 \quad (5-19)$$

其中,  $K_2$  是一个正的设计常数。

随后, 结合动态面控制策略以及自适应控制理论, 设计能处理系统模型中的建模误差和外界干扰的直流系统紧急功率支援控制器的虚拟控制变量, 设计过程中考虑下列第二个二次型:

$$V_2 = \frac{1}{2} S_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \phi^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \chi^2 \quad (5-20)$$

其中,  $\phi(t) := \theta(t) - \theta^*$ ,  $\chi(t) := \psi(t) - \psi^M$ 。  $\theta$  和  $\psi$  分别表示需根据自适应控制理论设计的未知参数  $\theta^*$  和  $\psi^M$  的参数估计法则; 其中,  $\psi^M = \max\{\psi^*, \psi^0\}$ ,  $\psi^0$  表示对未知参数  $\psi^*$  的初始估计;  $\phi(t)$  和  $\chi(t)$  为估计误差。

根据式(5-13)和(5-14),  $V_2$  的时间导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= S_2 \dot{S}_2 + \frac{1}{\gamma_1} \phi \dot{\theta} + \frac{1}{\gamma_2} \chi \dot{\psi} \\ &= S_2 (v + \theta^* x_2 + \Delta(t) - \dot{x}_{2d}) + \frac{1}{\gamma_1} \phi \dot{\theta} + \frac{1}{\gamma_2} \chi \dot{\psi} \end{aligned} \quad (5-21)$$

根据  $V_2$  的时间导数, 结合动态面控制策略和自适应控制理论, 设计能处理未知参数的虚拟控制变量如下:

$$v = -K_2 S_2 - \theta x_2 - \beta(x, \psi) + \dot{x}_{2d} \quad (5-22)$$

其中, 自适应控制方案选为:

$$\begin{cases} \beta(x, \psi) = \frac{S_2 \psi^2 \omega^2(x)}{S_2 \psi \omega(x) + \delta} \\ \dot{\theta}(t) = \gamma_1 [S_2 x_2 - \sigma_1 (\theta - \theta^0)] \\ \dot{\psi}(t) = \gamma_2 [S_2 \omega(x) - \sigma_2 (\psi - \psi^0)] \\ \omega(x) = \tanh\left(\frac{S_2}{\varepsilon}\right) \end{cases} \quad (5-23)$$

其中,  $K_2$  是根据动态面控制设计的正的设计参数,  $\theta$  和  $\beta$  是根据基于确定性等价理论<sup>[117]</sup>和一种  $\sigma$ -修正<sup>[118]</sup>的自适应控制设计的未知参数自适应控制方案。  $\theta$  是对  $\theta^*$  的参数估计,  $\beta$  是对未知综合建模误差以及综合外界干扰的自适应控制法则,  $\psi$  是对  $\psi^M$  的参数估计。其中,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\theta^0$ ,  $\psi^0$  是正的设计参数,  $\theta^0$  是对未知参数  $\theta^*$  的初始估计。

根据式(5-13)所表示的虚拟控制变量, 直流系统紧急功率支援控制的实际控制策略  $u_{dc}$  为:

$$u_{dc} = \frac{H_{T,B}T_d(\sum_{i \in A} \dot{P}_{mi} - \dot{P}_{LA} - \dot{P}_{ac})}{H_{T,A} + H_{T,B}} - \frac{H_{T,A}T_d(\sum_{i \in B} \dot{P}_{mi} - \dot{P}_{LB} + \dot{P}_{ac})}{H_{T,A} + H_{T,B}} - \frac{2H_{T,A}H_{T,B}T_d v}{H_{T,B} + H_{T,A}} + P_{dc} - P_{dcREF} \quad (5-24)$$

其中，虚拟控制变量  $v$  根据式(5-22)计算得到。

实际控制策略  $u_{dc}$  中，因为原动机、负荷和网损的变化速率比直流系统输送功率的变化速率小的多，因此设定：

$$\dot{P}_{mi} = 0, \dot{P}_{LA} = 0, \dot{P}_{LB} = 0 \quad (5-25)$$

此外， $\dot{P}_{ac}$  可由数字采样装置通过微分计算得到。

所设计的直流系统紧急功率支援控制策略结构图如图 5 - 3 所示

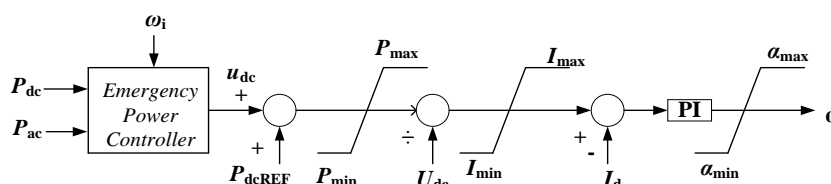


图 5 - 3 直流系统紧急功率控制策略结构图

Fig. 5-3 Configuration of HVDC emergency power control strategy

### 5.3.3 控制策略稳定性证明

引理 1<sup>[119]</sup>：对于任意的收敛的初始情况  $x(t)$ ，如果存在一个连续的  $C^1$  型且正定的李雅普诺夫函数  $V(t)$ ，且  $V(t)$  对时间的导数  $\dot{V}(t)$ ，满足  $\dot{V} \leq -kV(t) + c$ ，而且  $k$  和  $c$  是正整数，则  $x(t)$  是一致收敛的。

引理 2<sup>[81]</sup>：对  $\forall \beta > 0, \forall u \in R$ ，下列不等式恒成立：

$$0 \leq |u| - u \tanh\left(\frac{u}{\beta}\right) \leq K\beta \quad (5-26)$$

其中  $K$  是一个常数，并满足  $K = e^{-(K-1)}$ ，例如， $K=0.2785$ 。

引理 3：扬子不等式，

$$\left(\frac{Z^2 \rho^2}{2\mu}\right) + \left(\frac{\mu}{2}\right) \geq |Z|\rho \quad (5-27)$$

稳定性证明：

为了证明在所提直流系统紧急功率支援控制下，两区域交直流系统的稳定性，定义如下的候选李雅普诺夫函数：

$$V = \frac{1}{2}y_2^2 + \frac{1}{2}V_1^2 + \frac{1}{2}V_2^2 \quad (5-28)$$

根据式(5-15), (5-17)和(5-19),  $y_2$ 关于时间的导数为:

$$\dot{y}_2 = -\frac{y_2}{\tau} + K_1 \dot{S}_1 \quad (5-29)$$

根据式(5-18), (5-19), (5-21), (5-23)和(5-29), 以及式(5-22)所示的虚拟控制规律以及式(5-23)所示的自适应控制方案, 可得到候选李雅普诺夫函数  $V$  关于时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= y_2 \dot{y}_2 + S_1 \dot{S}_1 + S_2 \dot{S}_2 + \frac{1}{\gamma_1} \phi \dot{\theta} + \frac{1}{\gamma_2} \chi \dot{\psi} \\ &= -\frac{y_2^2}{\tau} + y_2 K_1 \dot{S}_1 - K_1 S_1^2 + S_1 S_2 + S_1 y_2 \\ &\quad - k_2 S_2^2 + \delta \left[ \frac{S_2 \psi \omega}{S_2 \psi \omega + \delta} \right] + S_2 \Delta - S_2 \psi^M \omega \\ &\quad - \phi \sigma_1 (\theta - \theta^0) - \chi \sigma_1 (\psi - \psi^0) \end{aligned} \quad (5-30)$$

根据式(5-13), (5-14), (5-17)和(5-19),  $S_1$ 关于时间的导数  $\dot{S}_1$  为:

$$\dot{S}_1 = S_2 + y_2 - K_1 S_1 \quad (5-31)$$

根据动态面控制的假设,  $S_1, y_2, S_2$ 是收敛的, 并且 $[S_1, y_2, S_2]$ 收敛于下列紧集:  $A := \{S_1^2 + y_2^2 + S_2^2 \leq p\}$ , 因此 $\dot{S}_1$ 收敛于一个连续函数, 有最大值<sup>[85-86]</sup>。又因为 $K_1$ 是一个正的设计参数, 可得到如下不等式:

$$|K_1 \dot{S}_1| \leq M \quad (5-32)$$

采用下列的变量替换:

$$K_1 = K_2 = 2 + \alpha_0, \quad \frac{1}{\tau} = 1 + \frac{M^2}{2\varpi} + \alpha_0 \quad (5-33)$$

其中,  $\alpha_0 > 0, \varpi > 0$ 。

根据扬子不等式, 可得到如下不等式:

$$|y_2| M \leq \frac{M^2 y_2^2}{2\varpi} + \frac{\varpi}{2} \quad (5-34)$$

根据式(5-28), (5-30), (5-32), (5-33)和(5-34), 可得到如下关于候选李雅普诺夫函数的不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\alpha_0 S_1^2 - \alpha_0 S_2^2 - \alpha_0 y_2^2 - \frac{\sigma_1}{2} \phi^2 - \frac{\sigma_2}{2} \chi^2 \\ &\quad + \delta + \frac{\varpi}{2} + \frac{1}{2} \psi^M \varepsilon + \frac{\sigma_1}{2} (\theta^* - \theta)^2 + \frac{\sigma_2}{2} (\psi^M - \psi^0)^2 \\ &\leq -CV + \lambda \end{aligned} \quad (5-35)$$

其中,

$$C = \min \{2\alpha_0, \sigma_1 \gamma_1, \sigma_2 \gamma_2\},$$

$$\lambda = \delta + \frac{\varpi}{2} + \frac{1}{2}\psi^M \varepsilon + \frac{\sigma_1}{2}(\theta^* - \theta)^2 + \frac{\sigma_2}{2}(\psi^M - \psi^0)^2$$

评注：设  $\rho = \lambda / C$ ，则系统的候选李雅普诺夫函数  $V(t)$ ，满足：

$$0 \leq V(t) \leq \rho + (V(0) - \rho)e^{-ct} \quad (5-36)$$

如果控制器设计参数  $K_1, K_2, \tau, \delta, \varepsilon, \gamma_1, \gamma_2, \sigma_1, \sigma_2, \theta^0, \psi^0$  选择恰当，则  $\rho$  可足够小；并且存在  $T$ ，当  $t \geq T$  时，可得到  $|S_i| \leq \sqrt{2\rho}$ ， $i=1, 2$ 。因为  $x_1 = S_1$ ，因此当  $t \geq T$  时，可得到  $|x_1| \leq \sqrt{2\rho}$ 。

即在式(5-22)、式(5-24)所示的控制法则和式(5-23)所示的自适应控制方案下，两区域交直流系统是稳定的。此外，控制器参数的选择直接影响直流系统紧急功率支援控制器的性能。

## 5.4 仿真分析

### 5.4.1 测试系统

在 PSCAD/EMTDC 搭建了如图 5-4 所示的四机两区域交直流混联系统作为所提直流系统紧急功率支援控制器的测试系统。测试系统中直流系统额定输电容量 201MW，额定电压 56kV，额定电流 3.6kA，线路 L781 和 L782 的传输有功功率均为 100.9MW，其余参数和潮流分别见文献[120]，其中，高压直流系整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定熄弧角控制；发电机励磁系统采用静止励磁系统，发电机未安装电力系统稳定器。

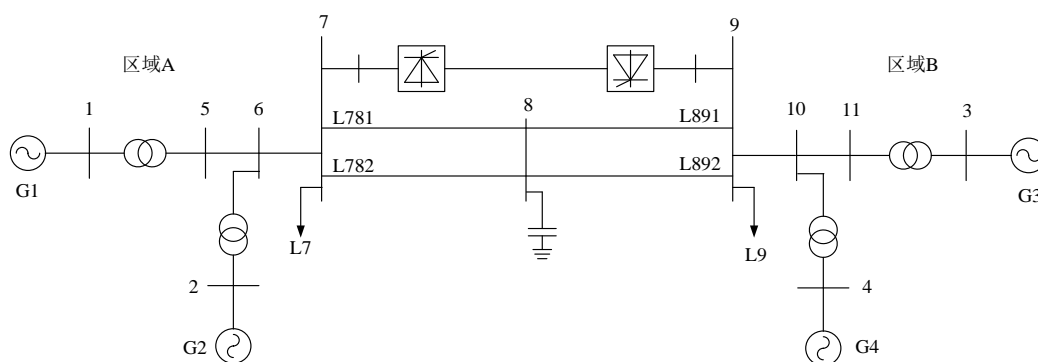


图 5-4 四机两区域交直流混联系统

Fig. 5-4 Four-generator two-area AC/DC parallel power system

### 5.4.2 稳定性仿真结果

控制器的控制效果与控制器参数的选择有直接关系，通过时域仿真试凑法，控制器参数选为  $K_1=20, K_2=20, \tau=0.0001, \delta=0.001, \varepsilon=0.0005, \gamma_1=100, \gamma_2$

$=100$ ,  $\sigma_1=0.1$ ,  $\sigma_2=0.2$ ,  $\psi^0=0.001$ ,  $\theta^0=0.001$ 。直流系统最大功率运行参考值和最小功率运行参考值  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  分别为:  $P_{\max}=1.17$ ,  $P_{\min}=0.5$ 。

使用所提直流系统紧急功率支援控制策略在下列所示系统不同故障以及不同运行点的算例情况下,与基于零极点配置技术和反步法设计的紧急功率支援控制策略进行了控制效果的对比分析。其中,基于零极点配置技术设计的直流系统紧急功率支援控制策略的结构框图如图 5-5 所示,控制器参数采用文献[72]中的相关控制器参数。基于反步法设计的直流系统紧急功率支援控制策略的结构框图与本文提出的控制器结构相同,其控制器参数采用文献[81]中的相关控制器参数。

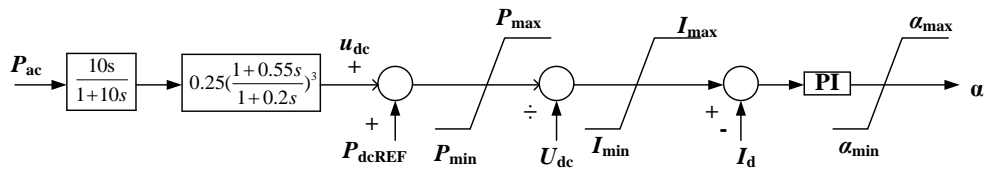


图 5-5 基于零极点配置技术的直流系统紧急功率支援控制策略结构图

Fig. 5-5 Diagram of HVDC emergency control strategy based on pole placement method

仿真算例如下所示:

算例 1: 直流系统运行在额定工况, 输送功率 201MW。20s 时线路 L892 母线 9 侧发生 3 相接地短路故障, 故障时间 0.1s, 20.1s 时切除故障线路, 21s 时启动直流系统紧急功率支援控制。

算例 2: 直流系统运行在额定工况, 输送功率 201MW。20s 时线路 L892 母线 9 侧发生 3 相接地短路故障, 故障时间 0.2s, 20.2s 时切除故障线路, 21s 时启动直流系统紧急功率支援控制。

算例 3: 直流系统运行在 0.75p.u., 输送功率 150.75MW。50s 时线路 L892 母线 9 侧发生 3 相接地短路故障, 故障时间 0.2s, 50.2s 时切除故障线路, 51s 时启动直流系统紧急功率支援控制。

算例 4: 直流系统运行在 0.6p.u., 输送功率 120.6MW。50s 时线路 L892 母线 9 侧发生 3 相接地短路故障, 故障时间 0.2s, 50.2s 时切除故障线路, 51s 时启动直流系统紧急功率支援控制。

选取 3 号发电机 G3 的功角作为参考值, 算例 1-4 中 3 种控制策略控制下 1 号发电机 G1 相对 3 号发电机 G3 的功角如图 5-6 所示; 算例 1-4 中 3 种控制策略控制下线路 L781 有功功率震荡情况如图 5-7 所示; 算例 1-4 中 3 种控制策略控制下直流系统输送的有功功率变化情况如图 5-8 所示。

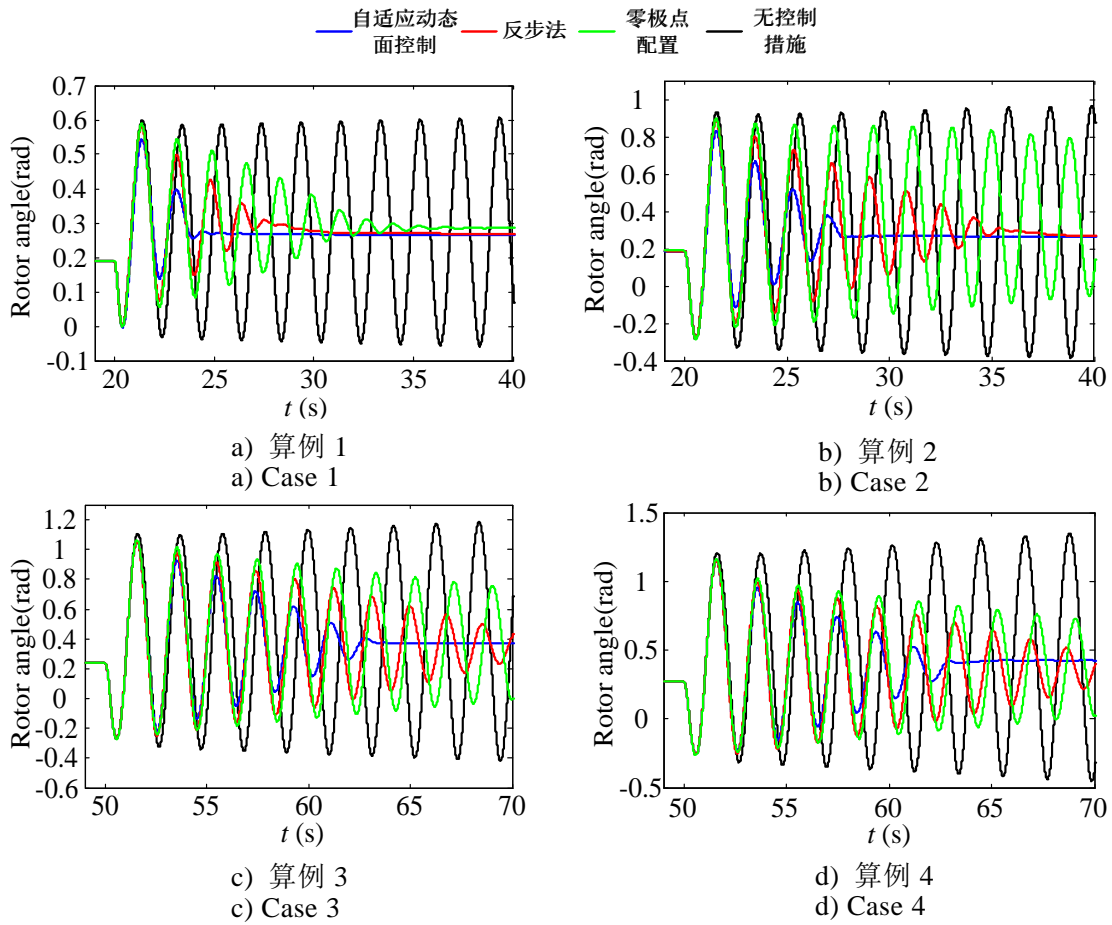
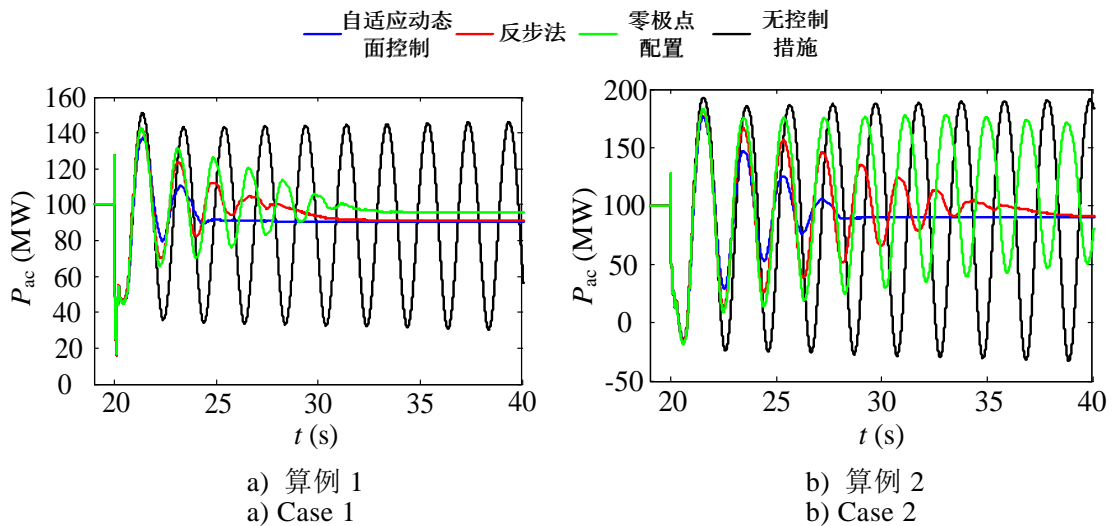


图 5-6 发电机 G1 的功角

Fig. 5-6 The rotor angle of generator G1



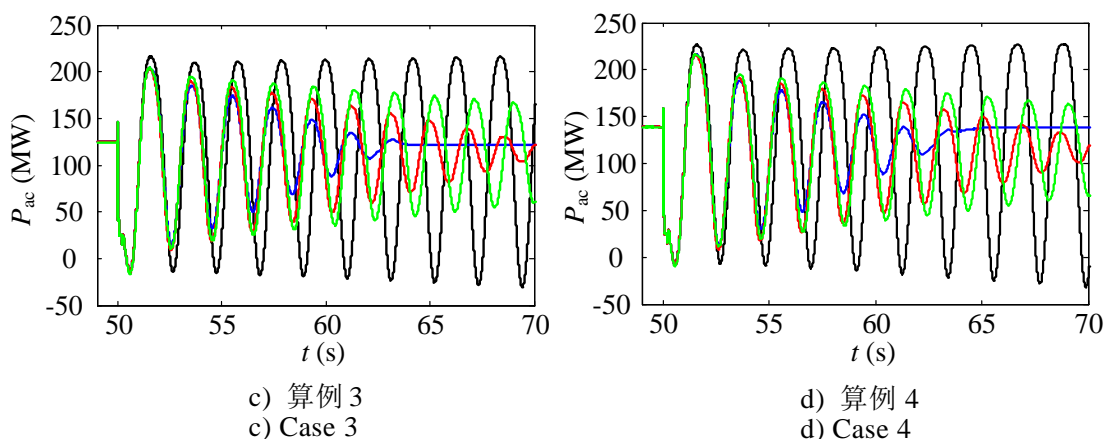


图 5-7 线路 L781 的有功功率

Fig. 5-7 The active power of Line L781

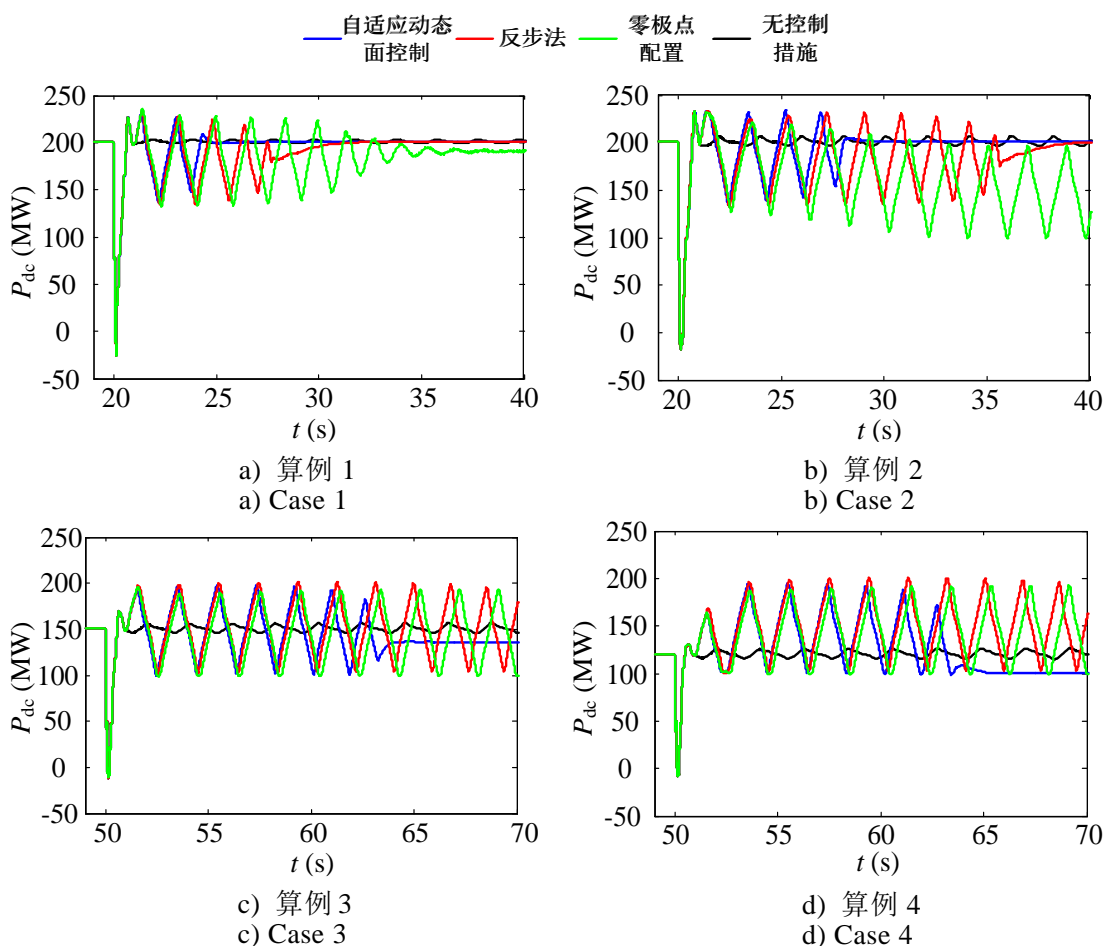


图 5-8 直流系统传输的有功功率

Fig. 5-8 The active power of HVDC system

从图 5-6-图 5-8 可以看出，算例 1-4 中，当不启用直流系统紧急控制策

略时，系统故障后失稳。在3种紧急功率支援控制策略的控制作用下，系统故障后能重新恢复稳定，但在本文所提紧急功率支援控制策略的控制作用下，发电机的功角和交流传输线上的震荡比在其他2种控制策略的控制下得到更快的抑制，系统更快的恢复稳定。

此外，根据零极点配置技术设计的直流系统紧急功率支援控制器属于线性控制方法。因此，这种控制器的控制效果与系统运行状态离系统平衡点的距离联系紧密。当系统在不同运行点发生较长时间故障时，系统状态与系统平衡点距离变大，系统的非线性特性变大。从图5-6-图5-8中所示的仿真结果可看出，在这种情况下，所提非线性控制器的效果优于零极点配置技术设计的控制器，并且优于基于反步法设计的直流系统紧急功率支援控制策略，所提控制策略对不同运行点以及不同故障类型有较强的适应性。

### 5.4.3 信号时滞的影响

广域测量系统信号传输存在时滞。为了分析所提控制策略对信号时滞的鲁棒性。分析了算例1所示的故障类型下，下列两种类型的信号时滞对控制策略的影响。

信号时滞类型1：发电机角速度信号和直流线路、交流线路功率信号均存在50ms的时滞；

信号时滞类型2：发电机角速度信号和直流线路、交流线路功率信号分别存在30ms和50ms的不均衡时滞。

两种信号时滞情况下，1号发电机G1相对3号发电机G3的功角、线路L781和直流系统传输的有功功率分别如图5-9-图5-11所示。

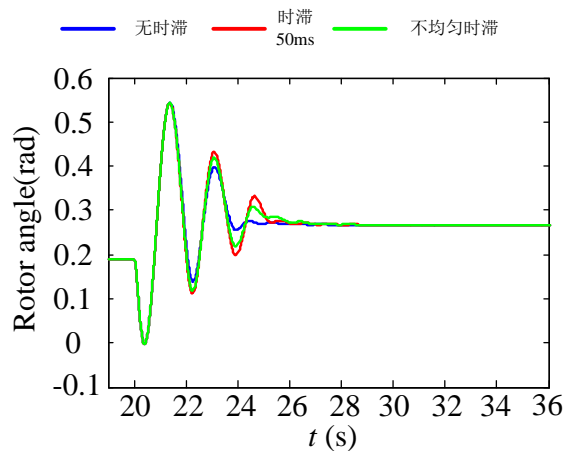


图 5-9 发电机 G1 的功角

Fig. 5-9 The rotor angle of G1

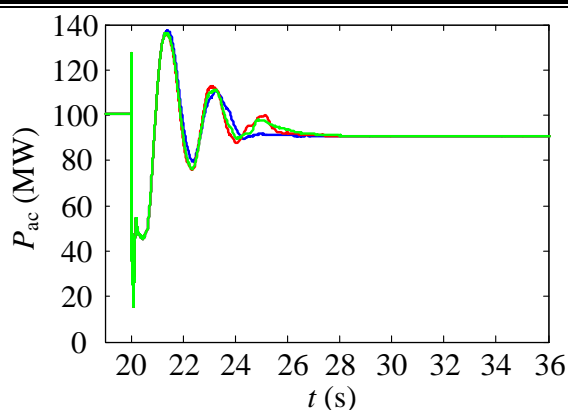


图 5-10 线路 L781 传输的有功功率

Fig. 5-10 The active power of line L781

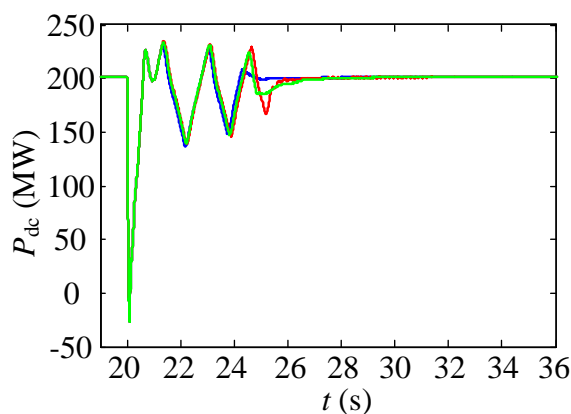


图 5-11 直流系统传输的有功功率

Fig. 5-11 The active power of HVDC system

从图 5-9 -图 5-11 所示的仿真结果可以看出，所设计的直流系统紧急功率支援控制策略在不同信号时滞存在的情况下，均有较好的控制效果，所设计的控制策略对信号时滞有良好的鲁棒性。

## 5.5 本章小结

在两区域交直流并列运行系统中，为设计对于系统不同运行点和不同故障等具有较强自适应性，鲁棒性强、控制效果良好的直流系统紧急功率支援控制策略，本章结合动态面控制策略和自适应控制理论，根据两区域交直流系统的 COI 模型，设计了基于自适应动态面控制的直流系统紧急功率支援控制策略。

本章首先分析了两区域交直流系统的 COI 模型，以两区域 COI 等值角速度为零为控制目标，提出了一种基于动态面控制策略和自适应控制理论的高压直流系统广域紧急功率支援控制策略，使用能量函数法理论证明了在所提控制策略控

制下交直流系统的稳定性。在四机两区域交直流混联系统上,将所提直流系统紧急功率支援控制策略与基于零极点配置和基于反步法设计的直流系统紧急功率支援控制策略做了仿真对比分析。对比分析表明,所提控制策略对系统不同故障和不同运行点有很好的自适应性和鲁棒性,其控制效果优于基于零极点配置和基于反步法设计的高压直流系统紧急功率支援控制策略。此外,仿真分析了所提控制策略在不同信号时滞下的控制效果;仿真分析表明,所提控制策略对信号时滞有较强的鲁棒性。

## 第6章 高压直流系统跟随风电功率波动控制策略研究

### 6.1 引言

风力发电作为可再生能源中技术最成熟、最具规模化开发能力的技术之一，在国内外发展迅速。在一些风力资源与负荷中心距离较远的地区，风力资源集中的地区电网结构较薄弱，当地用电负荷水平低、风电就地消纳能力有限，需要将大规模的风电远距离外送到电网结构较坚强的负荷中心进行消纳。目前，风电经“风火打捆”联网后通过传统直流系统远距离外送到负荷中心地区成为目前这类地区主要的风电外送消纳模式。我国西北地区风电大规模外送到华中等负荷中心地区即属于这类情况。

针对这类地区的风电外送消纳模式，为减少风电功率波动对送端地区的影响，利用直流系统传输功率快速可控的特点，本章研究了基于定功率控制策略的直流系统跟随风电功率波动的控制策略，通过直流系统将送端地区的风电功率波动转移到系统结构较强的受端地区；同时，为减少直流系统跟随风电功率波动时，直流系统配置的电容器等常规无功补偿装置的投切次数，提出使用 SVC 替代常规无功补偿装置以减少直流系统配置的常规无功补偿装置动作次数的无功补偿装置替代方案以及相应的协调控制策略。结合西北地区某“风火打捆”联网经直流系统外送实际工程，验证了所提控制策略的可行性和有效性。

### 6.2 直流跟随风电功率波动控制策略及无功补偿装置协调控制策略

#### 6.2.1 基于定功率控制策略的直流跟随风电功率波动控制策略

高压直流系统因其技术上的优势，在远距离大容量输电工程中得到广泛应用。同时其输送功率的调节相比交流输电线路要简单的多，直流线路的输送功率仅需通过调整其主控制极中直流输送功率参考值，进而调节直流系统整流侧和逆变侧的触发角即可完成，而交流输电线路传输功率的调节涉及到系统的电压和功角等状态变量，调节复杂。利用直流系统这一特点，基于定功率控制策略的直流跟随风电功率波动控制策略中，直流系统的主控制级的控制功能框图如图 6-1 所

示。

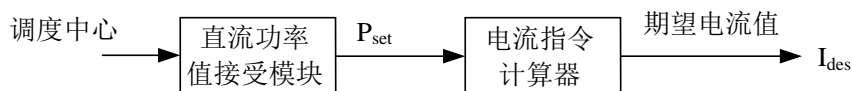


图 6-1 直流系统跟随风电功率波动控制策略主控制级控制框图

Fig. 6-1 Control diagram of main control of HVDC system follows the wind power fluctuation control strategy

主控制级的控制功能包括 2 个模块，第 1 个模块为直流系统输送功率参考值制定模型，功能是接受调度中心制定的“风火打捆”中风电及其配套的火电的发电计划，制定直流系统的输送功率指令值 ( $P_{order}$ )；第 2 个模块为直流电流指令计算模块，功能是根据给定的直流系统的输送功率指令值及常规直流直流侧电压计算直流电流指令值，即期望的直流电流值，并传送到极控级，其控制框图如图 6-2 所示。此外，在极控级中，整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定电压控制。

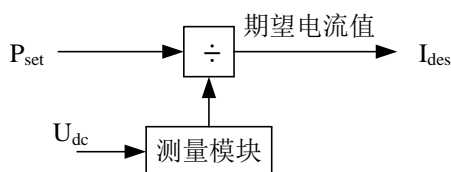


图 6-2 直流系统跟随风电功率波动控制策略直流电流指令计算模块控制框图

Fig. 6-2 Control diagram of current order calculation of HVDC system follows the wind power fluctuation control strategy

## 6.2.2 直流系统无功补偿装置协调控制策略

### 6.2.2.1 TSC 型 SVC 替代方案与协调控制策略

在“风火打捆”联网经直流系统外送系统中，当直流功率跟随风电功率波动运行时，将导致直流系统换流器消耗的无功功率发生变化，使直流系统配置的电容器等常规无功补偿装置动作。日常运行时，“风火打捆”联网外送系统中，风电功率波动较频繁，将严重增加直流配置的常规无功补偿装置的投切次数，影响其使用寿命。

随着电力电子技术以及计算机控制技术的发展与广泛应用，各种新型的柔性交流输电控制装置相继出现，并在电力系统中得到广泛应用。其中，由晶闸管控制投切的静止无功补偿器，因为其投资省、损耗小、可靠性高，特别是晶闸管对于控制信号反应极为迅速，而且通断次数可以不受限制等一系列优点，同时又比新兴的静止同步补偿器 (STATCOM) 技术成熟，控制简单，在电力系统中获得

广泛应用，为电力系统提供了重要的动态无功功率补偿手段。

根据 SVC 通断次数不受限制、控制简单可靠等特点，以及直流系统无功补偿中并联电容器的配备特点，使用 TSC 型 SVC 代替部分常规无功补偿装置，以减少直流系统输送功率跟随风电波动时常规无功补偿装置的投切次数。

直流外送系统中，送端和受端交流系统短路比较大，而且直流系统配备有常规无功补偿装置投切控制，来保证直流系统换流器消耗的无功功率的变化时，换流母线电压不发生剧烈变化。为使 SVC 的控制策略与换流站内装设的常规无功补偿装置的不平衡无功控制策略更好的协调，SVC 采用定无功功率控制策略。

利用 SVC 和直流换流器都属于电力电子器件，动作速度快于投切由机械开关控制，控制带有延时特性的常规无功补偿装置的特点，并且保证当直流系统换流器消耗的无功功率发生变化时，SVC 能够先于常规无功补偿装置动作，而且保证换流母线附近的火力发电机、风机等的无功功率情况变化较小，设计如图 6-3 所示的 SVC 协调控制器模型。

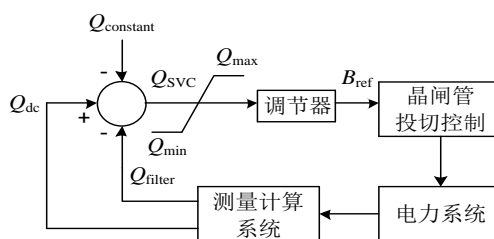


图 6-3 SVC 定无功功率协调控制器模型

Fig. 6-3 Constant reactive power coordinated controller model of SVC

其中： $Q_{dc}$  为直流系统换流器消耗的无功功率； $Q_{filter}$  为投入的常规无功补偿装置发出的容性无功功率； $Q_{constant}$  为根据系统额定运行状态设定的一个初始无功功率值，以保证换流器消耗的无功功率变化时，SVC 能准确动作，而且换流母线附近的火力发电机、风机等的无功情况变化较小。

### 6.2.2.2 常规无功补偿装置协调控制策略

利用常规无功补偿装置响应速度比 SVC 响应速度慢，控制带有延时特性的特点，在常规无功补偿装置的不平衡无功协调控制策略中引入换流母线处安装的 SVC 提供的无功功率  $Q_{SVC}$ ，保证在换流母线处安装 SVC 后，当传统直流系统消耗无功变化时，常规无功补偿装置将在 SVC 动作后才开始动作。设计的常规无功补偿装置的协调控制策略为：

当满足式(6-1)时，常规无功补偿装置切除。

$$Q_{filter} + Q_{SVC} - Q_{dc} - Q_{ac} \geq \Delta Q \quad (6-1)$$

式中： $Q_{ac}$  为设定的理想不平衡无功； $\Delta Q$  为略小于单组无功补偿装置容量的不

平衡无功。

当满足式(6-2)时，常规无功补偿装置投入。

$$Q_{dc} + Q_{ac} - Q_{filter} - Q_{SVC} \geq \Delta Q \quad (6-2)$$

## 6.3 仿真分析

### 6.3.1 仿真测试系统

在 PSCAD/EMTDC 中按照西北地区某“风火打捆”联网经直流系统外送工程搭建了仿真测试模型，系统模型结构如图 6-4 所示，直流系统结构及风电场出力以及风电场配套的火电厂额定出力为：直流输电系统采用双极双 12 脉动结构，风电场额定出力为 3600 MW；风电场配套火电厂额定出力为 4400 MW。测试系统系统参数如表 6-1 所示，整流侧和逆变侧配备的滤波器和并联电容器情况分别如表 6-2 和表 6-3 所示。

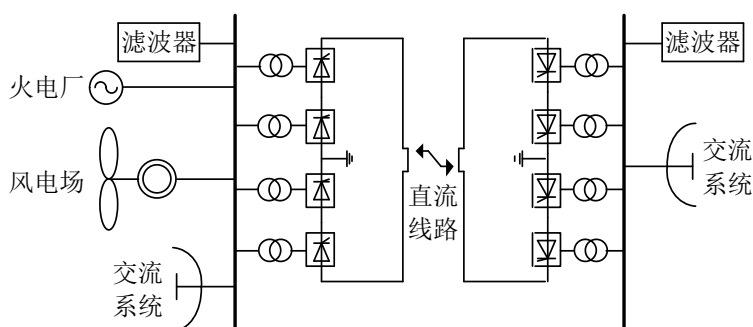


图 6-4 “风火打捆”联网经直流外送系统模型结构图

Fig. 6-4 Diagram of the wind-coal-bundle interconnected system with HVDC link model

表 6-1 测试系统系统参数

Table 6-1 System parameters of the test system

系统参数	整流侧	逆变侧
单极直流系统电压/kV	800	800
单极直流系统传输功率/MW	4000	4000
换流变压器容量/MVA	1215	1129
换流变压器额定变比	750/171	518/160
换流变压器漏抗/p.u.	0.2	0.19
交流系统换流母线电压/kV	750	525
交流系统短路容量/MVA	37184	41311

表 6-2 整流侧滤波器和并联电容器安装情况

Table 6-2 Install situations of the filter and shunt capacitor in rectifier side

装置类型	单组装置无功补偿	装置组数
BP11/13 型滤波器	230	4
HP24/36 型滤波器	230	4
HP3 型滤波器	230	3
并联电容器	270	5

表 6-3 逆变侧滤波器和并联电容器装置安装情况

Table 6-3 Install situations of the filter and shunt capacitor in inverter side

装置类型	单组装置无功补偿	装置组数
HP12/24 型滤波器	260	8
HP3 型滤波器	260	2
并联电容器	260	9

仿真模型中，直流系统的主控制级采用定功率控制策略，极控级采用整流侧定电流控制策略，逆变侧定电压控制策略，同时整流侧和逆变侧均配有低压限流控制环节；风电场采用双馈式异步发电机等值模型；风电场配套的火电厂采用同步发电机等值模型；此外，在整流侧使用一组容量为 270Mvar 的 SVC 替代一组相同容量的并联电容器，SVC 安装在变比为 750kV/35kV 的变压器低压侧。

SVC 采用图 6-3 所示的定无功功率协调控制策略， $Q_{\text{constant}}=650$ ；常规无功补偿装置采用所提的与 SVC 协调的不平衡无功功率协调控制策略，整流侧  $Q_{\text{ac}}=620$ ， $\Delta Q=230$ ；逆变侧  $Q_{\text{ac}}=445$ ， $\Delta Q=230$ ，整流侧和逆变侧常规无功补偿装置的动作延时为 2s。

### 6.3.2 仿真结果

仿真设置风速变化为：风速在 11s 到 14s 从风速额定值 11.5 m/s 下降到 9.5 m/s，之后在 16s 到 19s 内风速再上升到额定值；对应风电功率从额定值 3600MW 降低到 1980MW 后再上升到额定值。

风电功率波动时直流系统传输的有功功率和逆变侧直流系统电压如图 6-5-图 6-6 所示；整流侧交流母线电压如图 6-7 所示；SVC 发出的无功功率如图 6-8 所示。

直流系统传输功率跟随风电功率变化过程中，使用 SVC 替代常规无功补偿装置前后，常规无功补偿装置动作次数如表 6-4 所示。

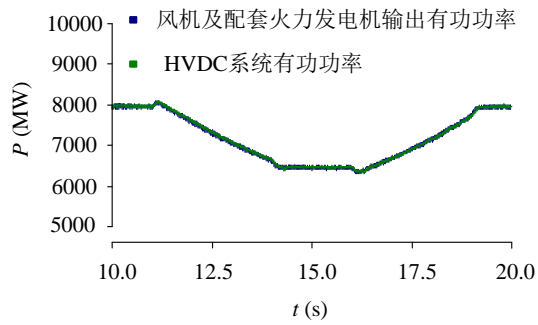


图 6-5 直流系统有功跟随风电功率波动曲线  
Fig. 6-5 HVDC system active power fluctuation following wind power

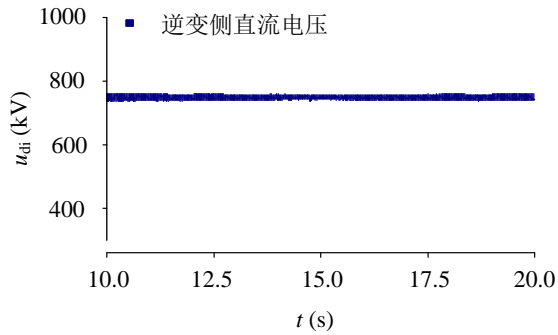


图 6-6 直流系统逆变侧直流电压  
Fig. 6-6 DC voltage of HVDC system inverter side

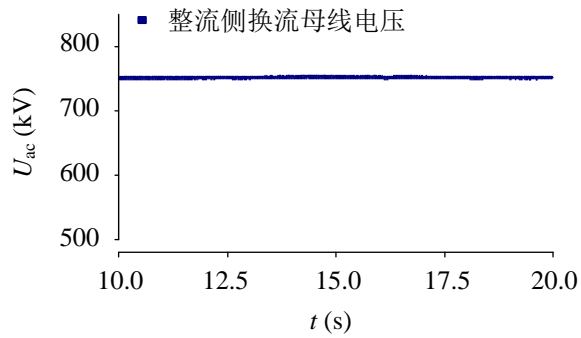


图 6-7 整流侧换流母线交流电压  
Fig. 6-7 AC voltage of converter bus at rectifier side

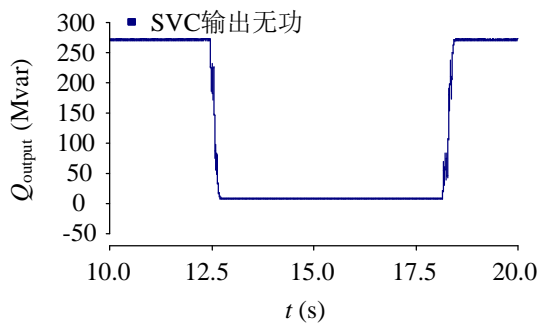


图 6-8 SVC 输出无功  
Fig. 6-8 Output reactive power of SVC

表 6-4 常规无功补偿装置动作次数  
Table 6-4 Action times of conventional reactive power compensation device

	使用 SVC 替代前	使用 SVC 替代后
常规无功补偿 装置动作次数(次)	5	3

从图 6-5-图 6-8 以及表 6-4 可以看出, 当直流系统采用定功率控制策略, SVC 采用定无功功率协调控制策略, 并与采用协调控制策略的常规无功补偿装置配合时, 直流系统输送的有功功率能够有效跟随风电功率波动, 此过程中, SVC 和常规无功补偿装置合理动作, 并可有效减少常规无功补偿装置在直流系统跟随风电功率波动时的动作次数, 同时可保证换流母线交流电压稳定。

## 6.4 本章小结

针对网架结构较薄弱的送端地区大规模风电通过“风火打捆”联网经直流系统外送到网架结构坚强的负荷中心这一风电外送消纳模式, 为把送端地区的风电功率波动转移到受端地区, 本章研究了直流系统跟随风电功率波动的直流系统定功率控制策略; 以及直流系统输送功率跟随风电功率波动过程中, 减少常规无功补偿装置动作次数的 SVC 替代常规无功补偿装置的方案, 以及 SVC 和常规无功补偿装置之间的相互协调控制策略。

结合西北某“风火打捆”联网经直流系统外送实际工程, 对控制策略进行了仿真分析。仿真分析表明, 常规直流采用定功率控制策略时, 常规直流的输送功率可以很好的跟随风电输出的功率波动; 使用 SVC 替代常规无功补偿装置, 并采用所提的 SVC 定无功功率协调控制策略以及常规无功补偿装置协调控制策略, 可在不改变现有常规无功补偿装置基本控制策略的前提下, 保证直流系统换流器消耗的无功变化时, SVC 和常规无功补偿装置合理动作, 有效减少常规无功补偿装置动作次数, 同时保证换流母线电压稳定。

## 第7章 结论与展望

### 7.1 主要结论

高压直流系统因其在远距离、大容量输电中的优势,在我国电力系统中得到广泛应用,使我国电力系统成为复杂的交直流混联电力系统,使交直流系统间的相互影响及动态行为分析越来越重要,并加重了交直流系统建模仿真的复杂度。与此同时,直流系统相比交流系统,具有输送功率调节方便、迅速,经济损失小等特点,为交直流系统的稳定控制以及风电等波动性较强的电力能源大规模、远距离传输提供了更多的经济性能好的控制手段。为此,本文从交直流系统的建模仿真和直流系统的控制策略两方面出发,使用动态相量理论对直流系统建模仿真,含电力电子装置的电力系统和交直流系统的电磁-动态相量混合仿真开展研究;并提出了对系统不同运行点和不同故障类型具有自适应性和鲁棒性的,基于自适应动态控制的直流系统紧急功率支援控制策略;此外,研究了适应风电功率波动的直流系统控制策略,以及减少此过程中直流系统配置的常规无功补偿装置动作次数的方案及协调控制策略。本文的主要研究成果总结如下:

1)交流系统对称情况下反应直流系统换流器谐波特性的单极 12 脉动 HVDC 系统的动态相量模型。根据动态相量理论在建立电力电子换流器模型时,可把换流器模型处理成代数模型,并能根据仿真需要,有选择的建立换流器的谐波模型的特点,根据本文分析的直流系统换流器开关函数模型,建立了在交流系统对称情况下,能反应直流系统换流器谐波特性的单极 12 脉动 HVDC 系统的动态相量模型,该模型包含完整的直流系统换流器、直流线路以及控制系统的动态相量模型,并分析了该动态相量模型的仿真过程。仿真分析表明,该动态相量模型能在使用较大仿真步长以及比直流系统电磁暂态模型简单的,代数形式的换流器动态相量模型的前提下,有效反映直流系统扰动和交流系统扰动下,包含直流系统换流器与交流系统之间的谐波动态特性在内的直流系统动态特性,验证了所提动态相量模型及仿真方法的有效性和准确性。完善了直流系统动态相量模型。

2)交流系统不对称情况下的高压直流系统三相动态相量模型。根据本文分析的直流系统换流器开关函数模型,结合交流系统不对称故障时交直流系统的谐波特性,建立了适用于交流系统不对称情况的,包含完整的直流系统换流器、直流线路以及控制系统的直流系统三相动态相量模型,并分析了该三相动态相量模型的仿真过程。仿真分析表明,直流系统三相动态相量模型能在使用较大的仿真

步长下以及代数形式的换流器三相动态相量模型的情况下,有效反应交流系统不对称情况时直流系统的动态特性;与电磁暂态模型相比,仿真精度能满足仿真需要,验证了所提动态相量模型及仿真方法的有效性和适用性。完善并扩展了 HVDC 系统动态相量模型的使用范围。

3) 含电力电子装置的电力系统电磁-动态相量混合仿真方法以及交直流系统电磁-动态相量混合仿真。根据电磁暂态模型和动态相量模型各自的优点,提出了含电力电子装置的电力系统中,电力电子装置使用动态相量模型,其余交流系统使用电磁暂态模型的电磁-动态相量混合仿真方法,对混合仿真中模型区域划分及相互等效方法进行了分析,并以交直流系统为例分析了该混合仿真方法的实现过程。在 MATLAB 中编程实现了交直流系统的电磁-动态相量混合仿真,并与电磁暂态模型仿真结果进行了对比。对比分析表明,所提出的混合仿真能在使用比电磁暂态模型简单易求解的直流系统动态相量模型以及较大仿真步长情况下,在不同的交直流系统扰动下,有效反映交直流系统的动态过程,验证了混合仿真的正确性和有效性。为交直流系统及含电力电子器件的电力系统混合仿真提供了新的思路。

4) 基于自适应动态面控制的高压直流系统广域紧急功率支援控制策略。根据两区域交直流系统 COI 等值模型,以两区域 COI 等值角速度差为零作为控制目标,使用动态面控制策略和自适应控制理论设计了能处理系统未知参数、未知建模参数误差和外界干扰等未知误差的,基于自适应动态面控制的直流系统紧急功率支援控制策略。理论证明了在所提控制策略控制下交直流系统的稳定性。在四机两区域交直流混联系统上做了仿真分析。仿真分析表明,所提控制策略对不同故障和系统不同运行点有很好的自适应性和鲁棒性,其控制效果优于基于零极点配置和基于反步法设计的高压直流系统紧急功率支援控制策略。此外,所提控制策略对信号时滞有较强的鲁棒性。

5) 直流系统跟随风电功率波动控制策略研究。利用直流系统输送功率快速可调的特点,针对网架结构薄弱的送端地区大规模风电通过“风火打捆”联网经直流系统外送到网架结构较坚强的负荷中心这一风电外送消纳模式,从不改变直流系统基本控制策略的角度出发,研究了直流系统跟随风电功率波动的直流系统定功率控制策略;以及该控制策略下直流系统输送功率跟随风电功率波动过程中,减少常规无功补偿装置动作次数的 SVC 替代常规无功补偿装置的方案,以及 SVC 和常规无功补偿装置之间的相互协调控制策略。

## 7.2 研究展望

本文在高压直流系统动态相量建模以及直流系统紧急功率支援控制策略、跟

随风电功率波动控制策略相关课题研究上进行了浅尝，在研究过程中，深感直流系统的建模仿真以及直流系统紧急功率支援控制策略、跟随风电功率波动控制策略相关问题的必要性和复杂性。本文虽取得了一些阶段性成果，但在本文的研究分析基础上，作者认为应在下列4个方面继续深入研究：

1) 对适应于交流系统不对称状态的直流系统的三相动态相量模型进行深入研究，继续提高直流系统三相动态相量模型的仿真精度；

2) 将含电力电子装置的电力系统的电磁-动态相量混合仿真方法扩展到含 SVC、FACTS 元件等电力电子器件的电力系统中，并将所提混合仿真方法嵌入到现有的电力系统商业仿真软件中；

3) 针对含多回直流的交直流系统，对基于自适应动态面控制的多回直流系统的紧急功率支援协调控制策略开展研究，推动动态面控制策略在直流系统紧急功率支援控制策略中的应用；

4) 将直流系统跟随风电功率波动控制策略以及 SVC 和直流系统配置的常规无功补偿装置间的协调控制策略应用到实际工程中，对具体工程问题开展研究。

## 参考文献

- [1] 能源发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家发展改革委员会, 2016
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012
- [3] 宋云亭, 郑超, 秦晓辉. 大电网结构规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012
- [4] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013
- [5] 赵惋君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [6] 黄家裕. 电力系统数字仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998
- [7] Zhu Haojun, Cai Zexiang, Gole A M, et al. Improved Coherency-Based Wide-Band Equivalents for Real-Time Digital Simulators [J]. IEEE Transaction on Power System, 2011, 26(3): 1410-1417
- [8] Shen Zhouxuan, Dinavahi V. Dynamic Variable Time-Stepping Schemes for Real-Time FPGA-Based Nonlinear Electromagnetic Transient Simulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4006-4016
- [9] Bahrman M P, Johnson B K. The ABCs of HVDC Transmission Technologies[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44
- [10] Sanders S R, Noworolski J M, Liu X Z, et al. Generalized Averaging Method for Power Conversion Circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(2): 251-259
- [11] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥, 等. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17
- [12] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 1-10
- [13] Padhy B, Srivastava S, Verma N K. A Wide-Area Damping Controller Considering Network Input & Output Delays and Packet Drop[J]. 2017, 32(1): 166-176
- [14] Yousefian R, Kamalasan S. Hybrid Transient Energy Function Based Real-Time Optimal Wide-Area Damping Controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 53(2): 1506-1516
- [15] Lachs W R. Area-Wide System Protection Scheme Against Extreme Contingencies[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1004-1027
- [16] Maksimovic D, Stankovic A M, Thottuvelil V J, et al. Modeling and Simulation

- 
- of Power Electronic Converters[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(6): 898-912
- [17]Mattavelli P, Stankovic A M. Dynamical Phasors in Modeling and Control of Active Filters[A]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems[C]. Orlando, 1999: 278-282
- [18]Stankovic A M, Lesieutre B C, Aydin T. Modeling and Analysis of Single-phase Induction Machines with Dynamic Phasors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 9-14
- [19]Stefanov P Č, Stanković A M. Modeling of UPFC Operation Under Unbalanced Conditions with Dynamic Phasors[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(3): 59-59
- [20]Stanković A M, Sanders S R, Aydin T. Dynamic Phasors in Modeling and Analysis of Unbalanced Polyphase AC Machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(1): 107-113
- [21]Mattavelli P, Stankovic A M, Verghese G C. SSR Analysis with Dynamic Phasor Model of Thyristor-controlled Series Capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 200-208
- [22]Parimi M, Monika M, Rane M, et al. Dynamic Phasor-based Small-signal Stability Analysis and Control of Solid State Transformer[A]. 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems[C]. New Delhi, 2016: 1-6
- [23]Gomes S, Martins N, Stankovic A. Improved Controller Design Using New Dynamic Phasor Models of SVC's Suitable For High Frequency Analysis[A]. 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition[C]. Dallas, 2006: 1436-1444
- [24]Yang T, Bozhko S V, Asher G M. Modeling of Uncontrolled Rectifiers Using Dynamic Phasors[A]. 2012 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion[C]. Bologna, 2012: 1-6
- [25]Yang T, Bozhko S, Asher G. Modeling of Active Front-end Rectifiers Using Dynamic Phasors[A]. 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C]. Hangzhou, 2012: 387-392
- [26]Yang T, Bozhko S, Asher G. Fast Functional Modelling of Diode-bridge Rectifier Using Dynamic Phasors[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(6): 947-956
- [27]Yang T, Bozhko S, Asher G. Active Front-end Rectifier Modelling Using Dynamic Phasors for More-electric Aircraft Applications[J]. Electrical Systems

- in Transportation Iet, 2014, 5(2): 77-87
- [28] Yun Lei, Liu Dichen, Zhou Chaoqun, et al. Modeling and Simulation of TCSC with Dynamic Phasors Considering Harmonic Characteristics[A]. 2009 International Conference on Energy and Environment Technology[C]. Guilin, 2009: 176-179
- [29] 党杰, 刘涤尘, 柏晓路, 等. 考虑谐波特性的简化 TCSC 动态相量法模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 74-78
- [30] Yao Wei, Wen Jinyu, He Haibo, et al. Modeling and Simulation of VSC-HVDC with Dynamic Phasors[A]. 2008 3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies[C]. Nanjing, 2008: 1416-1421
- [31] 潘武略, 徐政, 张静. 不对称运行条件下 VSC-HVDC 动态相量建模[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1705-1710
- [32] Qi Qingru, Yu Chang, Wai Chanka, et al. Modeling and Simulation of a STATCOM System based on 3-level NPC Inverter Using Dynamic Phasors[A]. 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Denver, 2004, 2: 1559-1564
- [33] Rajesvaran S, Filizadeh S. Modeling Modular Multilevel Converters Using Extended-frequency Dynamic Phasors[A]. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting[C]. Boston, 2016: 1-5
- [34] 夏黄蓉, 韩民晓, 姚蜀军, 等. 模块化多电平换流器动态相量建模[J]. 电工技术学报, 2015, 30(s2): 120-127
- [35] 鲁晓军, 林卫星, 安婷, 等. MMC 电气系统动态相量模型统一建模方法及运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5479-5491
- [36] 曾正, 赵荣祥, 杨欢. 含逆变器的微电网动态相量模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 65-71
- [37] 胡伟, 孙建军, 查晓明, 等. 基于动态相量法的逆变型分布式电源微电网建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 14-18
- [38] 黄胜利, 周孝信. 分布参数输电线路的时变动态相量模型及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 1-5
- [39] 应迪生, 张明, 陈家荣. 三相分布参数线路动态相量法的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 46-51
- [40] 戚庆茹, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 高压直流输电动态相量建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 28-32

- [41]Daryabak M, Filizadeh S, Jatskevich J, et al. Modeling of LCC-HVDC Systems Using Dynamic Phasors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1989-1998
- [42]洪善宁. 交流侧不对称故障时 HVDC 系统多态动态相量模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2008
- [43]王钢, 李志铿, 李海峰, 等. 交直流系统的换流器动态相量模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 59-64
- [44]Liu Chongru, Bose Anjan, Tian Pengfei. Modeling and Analysis of HVDC Converter Three-Phase Dynamic Phasor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery(S0885-8977), 2014, 29(1): 3-12
- [45]Mello F P, Feltes J W, Laskowski T F, et al. Simulating Fast and Slow Dynamic Effects in Power Systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1992, 5(pp): 33-38
- [46]孙峰. 电力系统仿真软件的比较研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2006
- [47]李妍, 荆盼盼, 王丽, 等. 通用储能系统数学模型及其 PSASP 建模研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 51-57
- [48]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, 2003
- [49]顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 基于 ATP-EMTP 的大型电力系统暂态稳定仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 54-56
- [50]林良真, 叶林. 电磁暂态分析软件包 PSCAD/EMTDC[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 65-66
- [51]杨卫东, 徐政, 韩祯祥. NETOMAC 在直流输电系统仿真研究中的应用[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(4): 10-14
- [52]杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 基于 NETOMAC 软件的直流输电系统混合仿真计算及参数优化[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 11-16
- [53]向婉芹, 盛四清. Matlab 电力系统工具箱在发电机进相运行仿真中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(20): 53-56
- [54]Heffernan M D, Turner K S, Arrillaga J, et al. Computation of AC - DC System Disturbances. Part I - Interactive Coordination of Generator and Converter Transient Models[J]. IEEE Power Engineering Review, 1981, 1(11): 4341-4348
- [55]Turner K S, Heffernan M D, Arnold C P, et al. Computation of AC-DC System Disturbances. Part II - Derivation of Power Frequency Variables from Converter Transient Response[J]. IEEE Power Engineering Review, 1981, 1(11): 4349-4355

- [56]Turner K S, Heffernan M D, Arnold C P, et al. Computation of AC-DC System Disturbances. Part III - Transient Stability Assessment[J]. IEEE Power Engineering Review, 1981, 1(11): 17-17
- [57]Reeve J, Adapa R. A New Approach to Dynamic Analysis of AC Networks Incorporating Detailed Modeling of DC Systems. Part II[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4): 2012-2019
- [58]Semlyen A, Iravani M R. Frequency Domain Modeling of External Systems in an Electro-Magnetic Transients Program[J]. IEEE Transactions on Power Systems Pwrs, 1993, 8(2): 527-533
- [59]Watson N R, Arrillaga J. Harmonic Assessment Using Electromagnetic Transient Simulation and Frequency-dependent Network Equivalents[J]. IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 641-650
- [60]Singh H, Abur A. Multi-port Equivalencing of External Systems for Simulation of Switching Transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 374-382
- [61]Semlyen A, Iravani M R. Frequency Domain Modeling of External Systems in an Electro-Magnetic Transients Program[J]. IEEE Transactions on Power Systems Pwrs, 1993, 8(2):527-533
- [62]Semlyen A, De Leon F. Computation of Electromagnetic Transients Using Dual or Multiple Time Steps[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1274-1281
- [63]朱浩骏, 蔡泽祥, 刘皓明, 等. 基于动态相量模型的交直流系统混合仿真[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(10): 83-88
- [64]鄂志君, 房大中, 陈家荣. 基于静止无功补偿器动态相量模型的混合仿真算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2008, 41(3): 331-337
- [65]赵畹军. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012
- [66]段瑶, 陈龙, 张步涵, 等. 华中电网的直流紧急功率支援问题[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 104-108
- [67]谢惠藩, 王海军, 陈潜. 云广特高压直流对南方电网稳定性影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 130-137
- [68]肖世杰. 电网安全稳定控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011
- [69]徐政, 高慧敏, 杨靖萍. 南方电网中直流紧急功率调制的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 24-26
- [70]贺洋. 德宝工程紧急直流功率支援策略研究[J]. 四川电力技术, 2011, 34(1):

1-4

- [71]Gao Feng, Zhou Xin, Sun Haishun, et al. Application of HVDC Emergency Control to Mitigate the First Swing Peak of UHV Tie-line Power Flow[A]. 2014 International Conference on Power System Technology[C]. Chengdu, 2014: 2236-2241
- [72]Kundur P. Power System stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1994
- [73]李文, 欧青立, 沈洪远, 等. 智能控制及其应用综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2006, 18(3): 376-381
- [74]谢惠藩, 王广军, 张尧, 等. 基于多分辨率分析正交小波神经网络的紧急直流功率支援预测[J]. 电网技术, 2010(8): 12-17
- [75]谢惠藩, 张尧, 聂树林, 等. 基于正交小波神经网络的广域紧急直流功率支援在线预测[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 82-86
- [76]林桥, 李兴源, 胡楠, 等. 基于多代理的紧急直流功率支援策略研究[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1150-1155
- [77]丁青青, 王赞基. 时间最优控制算法及其在 SVC 控制中的应用[J]. 清华大学学报自然科学版, 2004, 44(4): 442-445
- [78]谢惠藩, 张尧, 邓权帅, 等. 基于时间最优的快速平息区间扰动的紧急直流功率控制策略[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(11): 1267-1272
- [79]谢惠藩, 张尧, 林凌雪, 等. 基于时间最优和自抗扰跟踪的广域紧急直流功率支援控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 145-153
- [80]卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 清华大学出版社, 2008
- [81]朱浩骏, 兰洲, 蔡泽祥, 等. 交直流互联系统鲁棒自适应直流功率调制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 21-26
- [82]翁华, 徐政, 许烽, 等. 基于广域测量信息的 HVDC 鲁棒控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 103-109
- [83]常勇, 徐政, 王超. 基于广域信号的多目标鲁棒 HVDC 附加控制器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 1-6
- [84]Du Z, Zhang Y, Chen Z, et al. Integrated Emergency Frequency Control Method for Interconnected AC/DC Power Systems Using Centre of Inertia Signals[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(6): 584-592
- [85]Swaroop D, Hedrick J K, Yip P P, et al. Dynamic Surface Control for a Class of Nonlinear System[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(10): 1893-1899
- [86]Swaroop D, Gerdes J C, Yip P P, et al. Dynamic Surface Control of Nonlinear

- Systems[A]. Proceedings of the 1997 American Control Conference[C]. Albuquerque, 1997: 3028-3034
- [87]孙国法. 非线性系统动态面控制及其在伺服系统中的应用[D]. 北京: 北京理工大学, 2015
- [88]刘翠平. 非线性系统自适应动态面控制及其应用[D]. 东北电力大学, 2015
- [89]刘崇茹, 魏佛送, 陈作伟, 等. 幅值自适应的阶梯式紧急功率支援控制技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 123-128
- [90]翁华, 徐政, 许烽, 等. 直流系统紧急功率支援的限制因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1519-1527
- [91]Nunes M V A, Lopes J A P, Zurn H H, et al. Influence of the Variable-speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the Conventional Generators Integrated in Electrical Grids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 692-701
- [92]Banakar H, Luo Changling, Ooi B T. Impacts of Wind Power Minute-to-minute Variations on Power System Operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 150-160
- [93]迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81
- [94]李渝, 范高锋, 李庆, 等. 达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 88-92
- [95]郭小江, 马世英, 申洪, 等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115
- [96]Fan Xinming, Guan Lin, Xia Chengjun, et al. A Passivity Control Strategy for VSC-HVDC Connected Large Scale Wind Power[A]. 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference[C]. Washington. DC, 2013: 1-6
- [97]付永良, 王奔, 陈新华, 等. VSC-HVDC 风电并网的自抗扰无源控制策略[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 19-23
- [98]陈树勇, 徐林岩, 孙栩, 等. 基于多端柔性直流输电的风电并网控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(s): 32-38
- [99]Yin Haiping, Fan Lingling, Miao Zhixin. Coordination between DFIG-based Wind Farm and LCC-HVDC Transmission Considering Limiting Factors[A]. IEEE Energy Tech 2011 Conference [C]. Cleveland, 2011: 1-6
- [100]Lin Weixing, Wen Jinyu, Liang Jun, et al. A Three-Terminal HVDC System to Bundle Wind Farms With Conventional Power Plants[J]. IEEE Transactions on

- Power Systems, 2013, 28(3): 2292-2300
- [101]辛颂旭, 张运洲, 白建华. 远距离大容量直流输电风电功率调节方式研究[J]. 中国电力, 2013, 46(6): 70-74
- [102]Cai Rong, Yue Chengyan, Xie Hailian, et al. Control Strategy of LCC HVDC System for Large-scale Onshore Wind Power Transmission[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 32-39
- [103]李春华, 蒋碧松, 周勤勇, 等. 一种适用于风电外送的直流输电控制策略及无功投切方法[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3280-3285
- [104]翁华. 大规模交直流系统电磁暂态仿真和稳定控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- [105]徐政, 杨靖萍, 段慧. 一种适用于电磁暂态仿真的等值简约方法[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 37-40
- [106]夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995
- [107]鄂志君. 基于动态相量理论的电力系统建模与仿真研究[D]. 天津: 天津大学, 2008
- [108]Venkatasubramanian V, Schattler H, Zaborszky J. Fast Time-varying Phasor Analysis in the Balanced Three-phase Large Electric Power System[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1995, 40(11): 1975-1982
- [109]Lihua Hu, Robert Yacamini. Harmonic Transfer Through Converters and HVDC Links[J]. IEEE Transaction on Power Electronic, 1992, 7(3): 514-525
- [110]贾旭东, 李庚银, 赵成勇, 等. 电力系统仿真可信度评估方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010(19): 51-57
- [111]Ögren J. PLL Design for Inverter Grid Connection: Simulations for Ideal and Non-ideal Grid Conditions [J/OL]. 2010, Available : <http://www.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:430787>
- [112]孟桂芝, 马克茂. 一类不确定非线性系统的动态面输出调节方法[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(5): 103-108
- [113]刘希, 孙秀霞, 刘树光, 等. 非脆弱递归滑模动态面自适应神经网络控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(10): 1323-1328
- [114]贾涛, 刘军, 钱富才. 一类非线性时滞系统的自适应模糊动态面控制[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(1): 83-91
- [115]Yang W D, Xu Z, Han Z. Co-ordinated Hierarchical Control Strategy for Multi-infeed HVDC Systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2002, 149(2): 242-248

- 
- [116]Chang Yong, Xu Zheng, Cheng Gaihong, et al. Coordinate Damping Control of HVDC and SVC Based on Wide Area Signal[A]. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Montreal, 2006: 1-7
- [117]Astrom K J, Wittermark B. Adaptive Control[M]. MA: Addison-Wesley, 1989
- [118]Ioannou P A , Datta A . Robust Adaptive Control : A Unified Approach[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 79(12): 1736-1768
- [119]Polycarpou M M, Ioannou P A . A Robust Adaptive Nonlinear Control Design[A]. IEEE 1993 American Control Conference[C]. San Francisco, 1993: 1365-1369
- [120]徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004

## 攻读博士学位期间发表的论文及其它成果

### （一）学术论文

- [1] Liu Chongru, Zhao Yunhao, Wang Chao, Li Haifeng, Li Gengyin. Superposition Feature of the Switching Functions for the Dynamic Phasor Model of the Converters Under Commutation Failure[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1448-1454. (SCI 收录, 检索号: 000360478500024)
- [2] Zhao Yunhao, Liu Chongru, Li Gengyin, Annakkage Udaya D. Design of HVDC Wide-Area Emergency Power Support Control based on Adaptive Dynamic Surface Control[J]. IET Generation Transmission & Distribution. (SCI 刊源, 已录用)
- [3] 赵云灏, 夏懿, 周勤勇, 宋汶秦, 孙玉娇, 刘崇茹, 李庚银. “风火打捆”直流外送系统的直流系统无功补偿装置协调控制策略及配置方案[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2081-2086. (EI 收录, 检索号: 20162902593711)
- [4] 赵云灏, 刘崇茹, 李庚银, 贲飞龙. 高压直流输电系统三相动态相量建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(4): 752-760.
- [5] 赵云灏, 刘崇茹, 李庚银, 李越, 罗钢. 一种新型的交直流系统混合仿真方法[J]. 电网与清洁能源. 2017, 33(4): 1-6.
- [6] 李越, 刘崇茹, 赵云灏, 拾扬. 采用不同技术路线的特高压直流分层接入方式下的控制系统设计及对比分析[J]. 现代电力. (已录用)

### （二）专利

- [1] 周明, 赵云灏, 任艺. 多端统一电能质量控制器直流侧电压控制装置及方法 (发明专利, 授权号: CN201310326296.1).
- [2] 刘崇茹, 贲飞龙, 朱逸超, 郭龙, 赵云灏, 吴旻昊, 李庚银. 一种交直流混联系统不对称故障分析方法 (发明专利, 授权号: CN201410355582.5).

## 攻读博士学位期间参加的科研工作

- [1] 国家电网公司科技项目，“适应智能化发展需求的电网安全和充裕度控制技术研究与应”，2013.10-2014.12，参研人。
- [2] 国家电网公司科技项目，“特高压直流接入 750kV/1000kV 交流系统关键技术方研究”，2013.10-2014.12，参研人。
- [3] 国家电网公司科技项目，“常规直流跟随风电波动功率调整技术经济研究 (XT71-14-038)”，2014.10-2015.12，主研人。
- [4] 国家电网公司科技项目，“特高压交直流站一体化建设关键设计技术研究”，2015.1-2015.10，参研人。

## 致 谢

本论文是在导师李庚银教授和副导师刘崇茹教授的悉心指导和关怀下完成的，从课程设置、论文选题、课题研究到论文的撰写，论文工作的每一个环节无不凝聚了两位导师的大量心血。两位导师深厚的学术造诣，严谨求实的科学态度、宽广博大的胸襟、宽厚仁慈的性格、诲人不倦的师者风范，以及豁达的人生态度、不畏困难的进取精神，将使我受益终生。师恩难忘，在论文即将完成之际，谨向恩师表示最衷心的感谢和最崇高的敬意！

感谢周明教授的指导和帮助，周老师扎实、系统的专业知识以及严谨的科研作风和循循善诱的教学方法令我受益匪浅，借此机会表示衷心的感谢和由衷的敬意。

感谢电网所以及在加拿大曼尼托巴大学交流学习期间的同门、好友的热情帮助；感谢在篮球场上一起驰骋的伙伴们。

感谢我至爱的父母，无论什么时候，总是给予无私和无尽的支持，是他们默默的关心和鼓励使我能顺利完成学业。

对所有给予我关心和帮助的老师、同学、亲人、朋友们表示由衷的谢意！

本课题承蒙国家电网公司科技项目“特高压直流接入 750kV/1000kV 交流系统关键技术方案研究”资助，特此致谢。

最后，向在百忙之中抽出时间对本论文进行审阅、评议及参加本论文答辩的各位专家、老师表示衷心的感谢！

