



电气工程系列丛书

OVER-VOLTAGE ANALYSIS AND
PROTECTION SCHEME
OPTIMIZATION DESIGN FOR
HIGH-POWER CONVERTER SYSTEM

查烽炜 著

超大电流变流器
过电压分析及保护方案优化设计



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS



电气工程系列丛书

本书由江苏高校品牌专业建设工程资助项目（TAPP，项目负责人：朱锡芳，PPZY2015B129）、常州工学院－“十三五”江苏省重点学科项目－电气工程重点建设学科、2016年度江苏省高校重点实验室建设项目－特种电机研究与应用重点建设实验室、常州工学院自然科学基金（E3-6107-17-031）资助出版

查烽炜 著

超大电流变流器

过电压分析及保护方案优化设计



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

超大电流变流器过电压分析及保护方案优化设计 /
查烽炜著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5684-0653-6

I. ①超… II. ①查… III. ①变流器—过电压防护
IV. ①TM40

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 274564 号

超大电流变流器过电压分析及保护方案优化设计

Chao da Dianliu Bianliuqi Guodianya Fenxi Ji Baohu Fang'an Youhua Sheji

著 者/查烽炜

责任编辑/吕亚楠 吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/5.5

字 数/180 千字

版 次/2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0653-6

定 价/32.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

在电解、冶炼等工业应用中,变流系统的容量不断增大;磁约束核聚变、强磁场等科研工作在全球尤其是中国蓬勃开展,在不断提高变流系统容量的同时,又对系统可靠性提出了极端苛刻的要求。鉴于此,对超大电流变流器过电压保护策略进行深入、系统的研究,具有重要的理论意义和广泛的应用价值。

首先,本书提出了晶闸管换相过电压 RC 阻尼电路系统化设计方法,通过建立晶闸管关断暂态模型、开通暂态模型及换相过电压模型,围绕限制过电压的峰值、限制过电压的最大上升率、减少换相功耗、满足晶闸管开通电流应力要求这 4 个目标,对换相过电压 RC 阻尼电路参数进行优化设计。

其次,本书还对变流器操作过电压保护进行了深入分析,建立了分闸过电压暂态分析模型,完成了该过压保护方案的优化设计。另外,针对变流系统的特点,通过建立变流器空载合闸静电耦合过电压暂态模型,保护方案的优化设计较传统保护方案更加全面准确,具有较好的工程应用价值。

再次,根据系统行业标准阐述变流器雷击过电压保护器件的选型。

最后,针对直流侧过电压能量巨大的特点,提出了一种将金属非线性氧化物电阻、旁通、机械短路开关三者相结合过电压保护策略。

本书在写作过程中,得到了中科院等离子体物理研究所的大力支持,书中所举工程案例改编于该所承担的实际项目,傅鹏研究

员和宋执权研究员对本书提出了很多宝贵的修改意见;另外,在实验过程中得到了北京荣科恒阳整流技术有限公司周奇总工、苏州电通电力电子有限公司孙丹峰总工的倾力协助,在此向他们表示衷心的感谢。由于作者水平有限,书中疏漏和错误在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第1章 绪 论 001

- 1.1 超大电流变流器过电压保护的必要性 001
- 1.2 超大电流变流器中过电压的分类 003
- 1.3 研究对象 003
- 1.4 过电压保护方案概述 005
- 1.5 本书重点研究的几个问题 007
- 1.6 本书章节安排 008

第2章 换相过电压保护研究 009

- 2.1 晶闸管技术基础及其参数 009
 - 2.1.1 晶闸管结构与工作原理 009
 - 2.1.2 晶闸管的静态特性 011
 - 2.1.3 晶闸管的动态特性 012
 - 2.1.4 晶闸管基本参数 017
- 2.2 换相过电压保护研究现状 017
- 2.3 技术输入参数及保护电路设计目标 020
 - 2.3.1 技术输入参数 020
 - 2.3.2 保护电路设计目标 022
- 2.4 晶闸管关断过程 022
- 2.5 多并联晶闸管关断模型 023
- 2.6 晶闸管关断等效电路 026
- 2.7 保护电路参数优化设计 027
- 2.8 晶闸管开通电流上升率校核 031
 - 2.8.1 晶闸管开通模型 031

- 2.8.2 变流器开通等效电路 033
- 2.8.3 晶闸管开通电流的计算 034
- 2.9 阻尼电阻功率的计算 038
 - 2.9.1 一个周期内晶闸管阀关断时阻尼电阻消耗的能量 038
 - 2.9.2 一个周期内晶闸管阀开通时阻尼电阻消耗的能量 039
 - 2.9.3 阻尼电阻功率的计算结果 040
- 2.10 晶闸管换相过电压仿真 040
 - 2.10.1 PLECS 软件概述 040
 - 2.10.2 带反向恢复特性的晶闸管仿真模型 042
 - 2.10.3 仿真电路的建立 043
 - 2.10.4 仿真结果 045
- 2.11 阻容器件的选型 049
 - 2.11.1 电阻器的分类 050
 - 2.11.2 电阻器件选型 052
 - 2.11.3 电阻脉冲功率实验 053
 - 2.11.4 电容器基础知识 055
 - 2.11.5 电容器选型 057
- 2.12 设计结果 059
- 2.13 换相过电压阻尼电路测试 059
- 2.14 电流上升率测试结果 061
- 2.15 阻尼电阻功率测试结果 062
- 2.16 结论 063

第3章 操作过电压保护研究 065

- 3.1 操作过电压产生机理分析 065
- 3.2 技术输入参数 066
- 3.3 空载变压器分闸过电压暂态分析 069
 - 3.3.1 RC 阻尼电路抑制分闸过电压暂态分析 069

- 3.3.2 金属氧化物非线性电阻抑制分闸过电压分析 074
- 3.4 空载变压器分闸过电压仿真 084
 - 3.4.1 PSCAD 概述 084
 - 3.4.2 高压断路器模型 085
 - 3.4.3 电缆模型 086
 - 3.4.4 变压器模型 094
 - 3.4.5 高能型 MOV 模型 099
 - 3.4.6 变流器及直流排模型 100
 - 3.4.7 仿真结果 103
- 3.5 合闸静电耦合过电压 106
 - 3.5.1 产生的机理分析 106
 - 3.5.2 抑制措施 108
- 3.6 结论 109

第4章 雷击过电压保护 111

- 4.1 雷击过电压理论基础 111
 - 4.1.1 无损耗单导线中波过程 112
 - 4.1.2 行波的折射和反射 115
 - 4.1.3 行波通过串联电感和并联电容 118
 - 4.1.4 变压器绕组中的波过程 121
- 4.2 雷电的放电过程和电气参数 131
- 4.3 雷击过电压分类 133
- 4.4 避雷器 134
 - 4.4.1 保护间隙和管式避雷器 135
 - 4.4.2 阀式避雷器 136
 - 4.4.3 无间隙氧化锌避雷器(MOA) 136
- 4.5 工程案例技术输入参数 138
- 4.6 整流变压器网侧避雷器选型 139
 - 4.6.1 持续运行电压 139
 - 4.6.2 额定电压 140

4.6.3	标称放电电流	141
4.6.4	避雷器型号预选	141
4.6.5	避雷器主要技术参数校核	141
4.7	变压器阀侧防雷 MOV 选型	144
4.7.1	最大持续运行电压	144
4.7.2	直流参考电压	145
4.7.3	标称放电电流	146
4.7.4	MOV 型号预选	146
4.7.5	雷电冲击保护水平校核	148
4.8	结论	149

第 5 章 直流侧过电压保护研究 150

5.1	直流侧过电压产生原因	150
5.2	直流侧过电压的保护措施	151
5.3	BOD 触发旁通晶闸管阀的工作原理	152
5.4	直流侧 MOV 选型	156
5.5	结论	157

第 6 章 总结与展望 158

6.1	总结	158
6.2	工作展望	161

参考文献 162

第1章 绪 论

1.1 超大电流变流器过电压保护研究的必要性

超大电流变流器可输出数十乃至数百千安的直流电流,主要应用于轨道机车牵引驱动、磁约束核聚变、电解、冶炼、电机励磁等领域。在超大电流变流器的应用领域,供电系统的安全性和可靠性受到极端重视,一旦发生故障,将会造成巨大的经济损失,甚至危及操作人员生命安全。

超大电流变流器中各种电气设备的绝缘在运行过程中除了长期受到工作电压的作用(要求它能够长期耐受、不损坏、不会迅速老化)外,由于种种原因还会受到比工作电压高得多的电压作用,会直接危害到绝缘的正常工作,造成事故。这种对绝缘有危险的电压升高和电位差升高称为“过电压”。

一般来说,过电压都是由于系统中的电磁场能量发生了变化而引起的。究其原因,这种变化可能是由于系统外部突然加入一定的能量(例如雷击导线、设备或导线附近的大地)而引起的,或者是由于变流系统内部参数发生变化时电磁场能量发生了重新分配而引起的。过电压的作用时间一般很短,但其数值较高,可能使变流系统的正常运行受到破坏,使设备的绝缘受到威胁。

超大电流变流器过电压计算的必要性如下:

① 过电压计算是提高系统可靠运行的重要依据。变流系统供电的可靠性是由在一定时间内发生故障的次数和持续时间来判断的。可靠性在很大程度上取决于变流系统的冲击特性,有很多原

因可能导致变流器发生故障,但是半导体器件绝缘击穿是最常见的。如果系统绝缘只承受正常的运行电压,就不会有什么问题,因为正常运行电压只在很小的范围内变化,但实际上,绝缘要承受各种过电压的冲击,不同种类的过电压的波形、幅值和持续时间均不相同,变化范围很大,这些都考验着系统的绝缘性能。如果不对系统可能产生的过电压予以抑制,仅靠提高半导体变流器件的绝缘性能是不可能实现系统可靠运行的,除了半导体变流器件材料方面的限制之外,提高半导体器件的耐压值意味着巨大的成本投入。所以,过电压保护研究是提高变流系统可靠运行的关键。

② 过电压计算是超大电流变流器工程调试的重要保证。超大电流变流器建造完毕,启动之前需要对系统中可能发生的过电压进行计算,这是保证系统安全的重要手段。如果计算出的过电压超过系统绝缘裕度,可以通过增加保护器件予以抑制,从而有效解决调试过程中内部过电压的问题。

③ 过电压计算是考核变流系统设计是否合理的重要方法。在系统设计阶段,不但需要进行过电压核算,而且还要对电路拓扑是否正确、半导体器件选型是否合理、并联数是否合适、电气参数是否恰当等多方面进行校验。同时,过电压计算也是超大电流变流器设备过电压与绝缘配合是否合理的重要考核手段。

因此,为了保证系统安全、经济的运行,必须研究过电压产生的机理和物理过程、影响因素,从而提出限制过电压的措施,以保证电气设备能够正常运行并得到可靠保护。

电力系统过电压研究成果比较多^[1-2],但是变流系统过电压保护这一特殊领域缺乏相关的研究成果可以参考。大功率变流器过电压保护技术往往依靠一些简单的经验公式和盲目的放大裕度,这不仅造成了元件的浪费,更危险的是可能对变流系统实际运行时的安全裕度缺乏准确的认识而导致过电压事故的发生。本书围绕一个实际的工程案例,从系统的观点对大功率变流器过电压做定量研究,进而对保护方案进行优化设计,研究成果也可以推广应用于其他大功率变流设备,对于减少工业生产中变流系统的过

电压事故具有实用价值。

1.2 超大电流变流器中过电压的分类

超大电流变流器中可能出现的过电压如图 1-1 所示。按发生位置的不同可以分为来自变流器交流线路的雷击过电压、操作过电压,来自变流器内部的晶闸管换相过电压和来自变流器直流侧负载端的直流侧过电压。

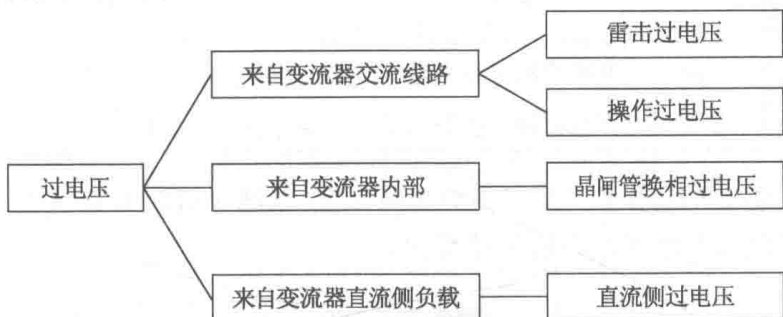


图 1-1 系统中可能出现的过电压

1.3 研究对象

本书以一个实际工程案例为研究对象,该变流系统电路拓扑如图 1-2 所示。66 kV 母线经高压断路器、整流变压器降压至 1.05 kV,再经大功率变流器整流,输出额定电流为 55 kA 的直流超大电流;变流器为三相全控桥结构,主要设备电气参数见表 1-1。

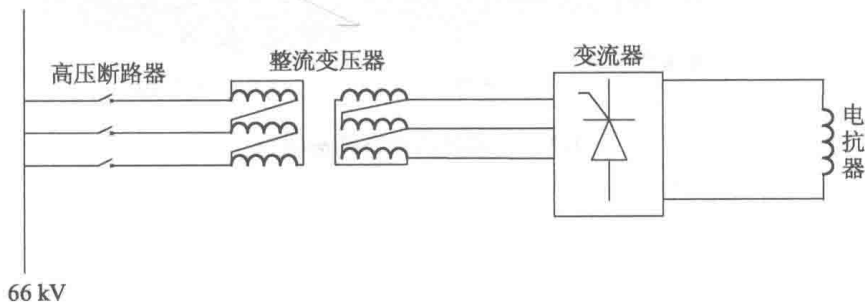


图 1-2 工程案例电路拓扑

表 1-1 工程案例主要设备电气参数

电气参数		数值
整流变压器	额定一次侧/二次侧电压	66 kV/1.05 kV
	额定容量	41 MVA
	短路阻抗	16%
	空载电流	0.5%
电抗器	电感值	5 mH
变流器	变流器额定输出电流	± 55 kA
	变流器理想空载电压	± 1.42 kV

图 1-3 给出了工程案例的布局模型,从图中可以看到整个变流系统内所有电气设备的连接情况。

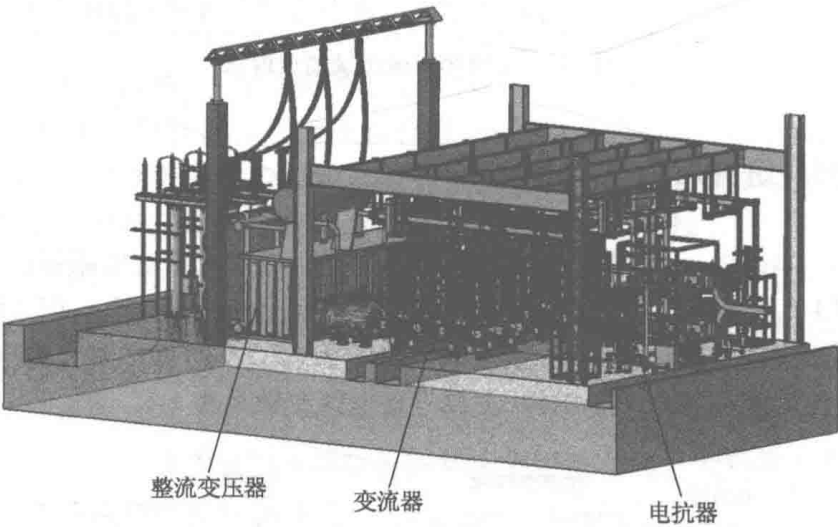


图 1-3 工程案例设备布局模型

1.4 过电压保护方案概述

对变流系统中不同性质的过电压应该采取不同的抑制措施,保护方案如图 1-4 所示。

雷击过电压是雷击电力系统或电力系统附近地区形成的电压升高,引起过电压的能量来源于系统外部的雷电能量;可在整流变压器的网侧三相对地之间接避雷器抑制雷击过电压,还可通过静电耦合到变压器阀侧,可在变压器阀侧三相对地加装高压型金属氧化物非线性电阻予以抑制。操作过电压是由于电力系统内部开关操作时发生电磁振荡所引起的系统电压升高,高压断路器合闸时整流变压器网侧的高频浪涌电压可通过静电耦合到阀侧,可在阀侧三相对地加装电容予以抑制。整流变压器空载分闸时产生的过电压可使用高能型金属氧化物非线性电阻加以吸收;晶闸管关断时,器件中会流过反向恢复电流,快速衰减的反向恢复电流会在回路电感上感应出尖峰电压,称为换相过电压,换相过电压可用 RC 阻尼电路予以吸收。由于直流侧过电压释放能量巨大,需要联合使用高压型金属氧化物非线性电阻和旁通及 PMS 开关加以抑制。本书将在随后的章节中对以上过电压保护方案进行详细阐述。

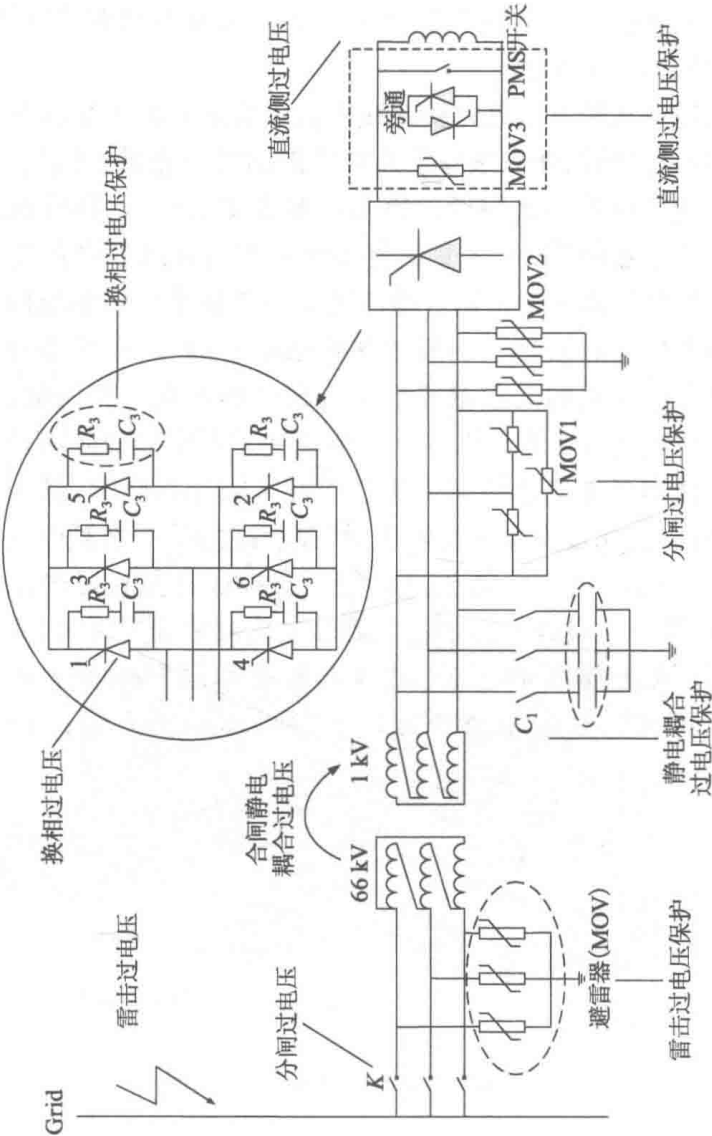


图 1-4 过电压保护方案

1.5 本书重点研究的几个问题

(1) 变流系统过电压保护的的特殊性

变流系统作为电力系统的一部分,它与电力系统既有共性,也有其特殊性。过电压保护方案的设计首先要考虑过电压在交直流系统中的耦合,这是研究的一个重点。电容器可以抑制过电压,这是它对系统有利的一面,然而大功率变流器的核心部件是晶闸管,在晶闸管开通时,电容放电将会增加晶闸管开通电流的应力,如何在满足过电压保护要求的同时减少或消除保护器件对系统的不利影响是本书研究的一个重点。

(2) 建立晶闸管元件的开通和关断暂态模型

有很多相关文献研究过单个晶闸管的关断模型,然而大功率变流器中每个桥臂需用多个晶闸管并联来承担较大电流,由于桥臂并联支路电气参数不可能完全对称,并联的各个晶闸管关断时刻不一致,反向恢复过程中各并联支路间存在电流转移,因此基于单管工作的关断模型不再适用,如何建立多并联晶闸管的关断模型是本书研究的又一个重点。

同样,并联晶闸管不可能同时开通,第一个开通的晶闸管承受了较大的电力应力,现有文献对于晶闸管开通暂态大多数采取理想开关模型来等效,计算结果往往存在较大误差,甚至得到矛盾的结果,如何更准确地建立晶闸管开通暂态模型来计算晶闸管开通电流应力是较难解决的问题。

(3) 建立主电路电气设备暂态模型

过电压研究所涉及的频率范围比较广,超大电流变流器中每个设备的模拟都要与所研究的特定暂态现象的频率范围相符合。同一个设备,研究过电压的暂态模型与稳态模型大不一样,甚至针对不同性质的过电压,建立的暂态模型也有很大区别。如何根据频率范围建立设备的暂态模型是一个重点。

超大电流变流器中大部分元件属于线性元件,但也有一些元

件具有明显的非线性特性,对暂态过程产生明显的影响。典型的非线性元件有避雷器、变压器铁芯(非线性电感)。在实际工程应用中,如何对这些非线性元件建模是本书研究的重点。

1.6 本书章节安排

第1章是绪论。首先介绍了本书的研究背景和研究意义;其次阐述了超大电流变流器中过电压的分类,并以一个工程实例作为研究对象对过电压保护方案进行了概述;最后指出本书重点研究的方向。

第2章对换相过电压保护器件做了系统化研究。对多并联晶闸管的开通、关断暂态过程进行了分析、建模; RC 阻尼电路的设计不仅考虑了换相过电压的峰值及上升率的抑制、功耗的减少,并且对晶闸管开通时的电流上升率进行校核;计算了电阻功率并完成了阻容器件的选型;最后对设计方法做了仿真及实验验证。

第3章分析了操作过电压的抑制措施,包括整流变压器网侧合闸时静电耦合过电压抑制,变压器空载分闸时过电压抑制;并根据实际工况建立了暂态模型,对传统过电压保护方案进行了优化设计。

第4章分析了雷击过电压的抑制措施。根据超大电流变流器具体工况,分别对变压器网侧避雷器和变压器阀侧金属氧化物非线性电阻进行选型。

第5章首先分析直流侧过电压的产生机理,提出了新型保护策略,并根据实际工况建立了暂态仿真模型对保护方案予以验证。

第6章总结与展望是对全书主要研究成果的总结,指出本书中研究的创新点,并提出今后进一步研究的设想。