



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 电力系统 故障电流限制技术 原理与应用

武守远 戴朝波 等 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

# 电力系统 故障电流限制技术 原理与应用

---

武守远 戴朝波 等 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书汇集了编者近年来在电力系统故障电流限制技术领域的最新研究内容和成果,较为系统、全面地介绍了世界首套 500kV 超高压电网故障电流限制器,注重基本原理、技术研究与示范工程应用相结合,力求表述严谨、图文并茂。

全书共五章,第 1 章绪论,介绍电力系统故障电流限制技术的基本知识,并侧重阐述超高压电网的串联电抗器限流技术。第 2 章故障电流限制器的技术原理,综述了具有一定代表性的故障电流限制器。第 3 章故障信号识别,论述了主动式故障电流限制器所不可或缺的故障信号识别技术,并侧重于实用高效的快速识别算法。第 4 章超高压故障电流限制器示范工程,首次系统介绍超高压故障电流限制器示范工程,内容涉及从工程实施前的选点方案比较,到全方位检验限流器性能的短路试验。第 5 章控制保护及其实时仿真,阐述了控制保护系统、实时仿真及限流器与继电保护的配合。

本书适合于从事电力系统故障电流限制技术、串联电容器补偿技术、智能电网电力装备技术、高电压技术研究的科研人员,高等院校电力专业师生,技术开发与工程设计人员阅读,也可作为相关领域研究的参考教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力系统故障电流限制技术原理与应用/武守远,戴朝波编著. —北京:中国电力出版社,2014.9

ISBN 978-7-5123-5711-2

I. ①电… II. ①武…②戴… III. ①电力系统-限流措施  
IV. ①TM72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 061435 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 17.25 印张 263 千字

印数 0001—1500 册 定价 78.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

# 《电力系统故障电流限制技术原理与应用》

## 编 委 会

主 编 武守远

副 主 编 戴朝波

编写人员 项祖涛 申 洪 王宇红 刘之方

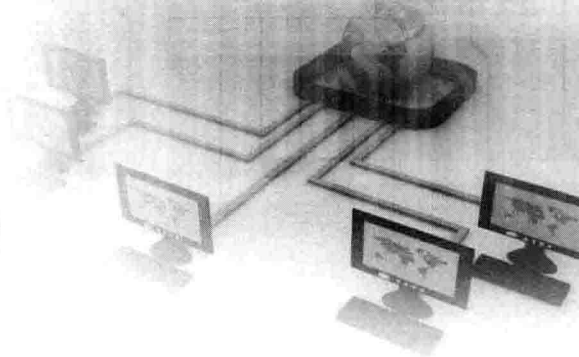
鲍 伟 金雪芬 杨国庆 沈 冰

李志兵 董勤晓 喻劲松 傅晨钊

周 玮 袁洪亮 杨增辉 李志远



# 序一



随着电网的迅速发展，负荷中心大电源的相继投入，以及大区域电网之间互联的完成，短路电流超标逐渐成为突出的问题之一。从根本上讲，合理的网络结构是降低短路电流水平的最有效、最基本的方法。此外，还可在特定条件下，采取一些必要的措施来降低短路电流，装设故障电流限制器就是其中的一种。因此，故障电流限制器得到众多科研机构、高等院校和设备制造厂商的广泛关注。

故障电流限制器为解决短路电流超标问题提供了一种新思路、新方法。在不改变现有电网结构、无需更换大量原有设备的情况下，通过在电网的某些位置装设故障电流限制器，可将电力系统短路电流限制在允许范围内，解决了电网联网和成环过程中的技术难点，提高了系统的暂态稳定性。

《电力系统故障电流限制技术原理与应用》是一本较为系统地论述故障电流限制技术的发展现状、工作原理及工程应用的电力专业书籍。

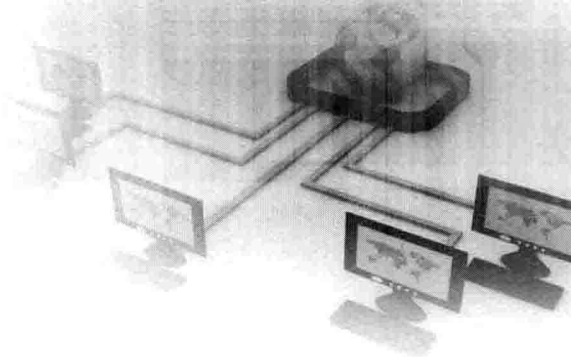
本书介绍故障电流限制技术的发展现状及其实用性，阐述了故障电流限制器的技术原理和类型，并着重分析了基于晶闸管阀保护串联电容器技术的串联谐振型故障电流限制器的原理和控制保护系统，且对故障电流限制技术中的关键技术——故障信号快速识别技术进行了详尽的分析仿真研究和试验验证，此外还介绍了当前国内外故障电流限制器的典型工程应用。

本书由国网智能电网研究院、中国电力科学研究院、国网上海市电力公司电力科学研究院和国家电网公司华东分部的专家共同完成。这些专家长期从事灵活交流输电（FACTS）技术的研究与应用，有着深厚的理论基础和工程实践经验。全书条理清晰、论述详实、由浅入深，既通俗易懂，又有相当的理论深度，适合相关领域学者、工程技术人员参考。

中国科学院院士  
中国电力科学研究院名誉院长



## 序二



随着电力系统规模的日益增大和系统网络的互联，短路电流水平不断上升，要求断路器的分断能力必须更强。然而，分断能力更强的断路器可能在制造上存在较大的技术困难，并且更换分断能力更强的断路器及配套设备，工期较长、工程量较大，不一定是经济有效的解决方案。装设故障电流限制器往往是解决这个问题较为经济有效的措施之一。因此，故障电流限制器是理论研究和工程应用的热点之一。

本书较为系统地介绍了国内外故障电流限制技术的发展概况，分析了各类型故障电流限制器的工作原理，着重讨论了故障电流限制技术中的故障信号快速识别技术的研究开发和仿真试验，还结合实际工程详细介绍了位于500kV 瓶窑变电站的超高压电网故障电流限制器。

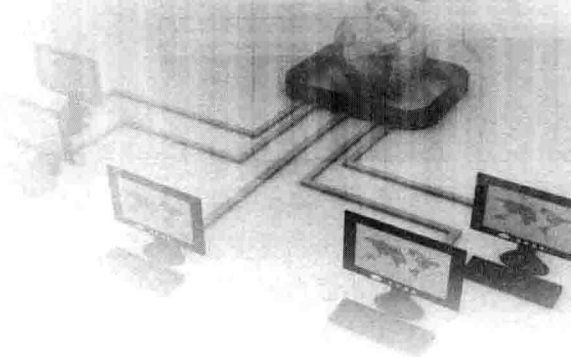
本书主编武守远教授级高级工程师和副主编戴朝波高级工程师从事灵活交流输电技术的研究与应用十多年，在《中国电机工程学报》等核心期刊多次发表相关论文，有着丰富的工程实践经验。武守远多次获得国家科学技术进步奖，并组织协调和技术把关多个重大项目。戴朝波作为我的硕士研究生，从攻读硕士学位开始便较为系统地学习了电力电子和灵活交流输电技术，后又在英国的伯明翰大学获得博士学位，这么多年一直工作在电力电子和灵活交流输电技术的科研一线，研究成果显著。非常高兴看到这两位科研工作者能够及时总结瓶窑故障电流限制器示范工程的成功经验，并组织大家编写出《电力系统故障电流限制技术原理与应用》。

全书条理清晰，内容丰富翔实，适合具有一定理论基础和工程实践经验的专业人员阅读，对广大电力科研人员也有相当的启发性和参考价值，有助于限流技术的推广应用。

中国电力科学研究院教授级高级工程师



## 前言



电网正常运行时,故障电流限制器表现为零阻抗或微小阻抗,功率接近于零;在电网发生短路故障时,迅速呈现高阻抗以达到抑制短路电流的目的。这样的工作原理使得故障电流限制器成为解决系统关键点的短路电流水平超标问题的重要途径之一。早在 20 世纪 70 年代就有人提出了故障电流限制器的概念,在之后的几十年里,众多研究人员一直在努力开发技术上可行、经济上可接受的故障电流限制器。30 年前,高温超导的发现使超导限流器成为一个重要研究分支,近十多年内,有超导限流器试验工程已陆续投运。

编者有幸先后全程参与国家电网公司“超高压电网故障电流限制器关键技术与示范工程前期研究”和“超高压电网故障电流限制器关键技术与示范工程”两个重大科技项目,并与中国电力科学研究院、华东电网有限公司、华东电力试验研究院等单位的同行、专家和中国工程院院士郑健超、中国电力科学研究院副院长邱宇峰一起通过三年多的努力,最终于 2009 年 12 月 25 日在华东电网 500kV 瓶窑变电站成功投运了世界上第一台 500kV 故障电流限制器。

鉴于首次是在 500kV 线路上实施故障电流限制器,且整个项目的研究开发和试验验证时间相对较短,所以示范工程所采取的技术路线略为保守,致使装置的占地偏大,成本稍高,控制保护略显复杂。值得欣慰的是,装置投运以来长期安全稳定运行,为应对我国电网短路电流超标、限制故障电流、确保电网安全可靠运行提供了新的技术手段和系列关键技术支持。之后,中电普瑞科技有限公司对示范工程的技术方案开展了降低成本、减少占地、简化保护策略等方面的专题研究,研究结果表明,优化后的基于晶闸管阀保护串联电容器技术的串联谐振型故障电流限制器是超高压电网限制故障电流的非常有竞争力的解决方案。

尽管示范工程的技术方案从固定串补和可控串补中借鉴了不少成功经验,但不容置疑,基于晶闸管阀保护串联电容器技术的串联谐振型故障电流

限制器是限流器，不是串联补偿装置。用途和作用的不同决定了技术要求、设计思路、解决措施等不同，从而使故障电流限制器呈现出不同的性能和特点。

本书的重中之重是全方位、系统地介绍基于晶闸管阀保护串联电容器技术的串联谐振型故障电流限制器及其示范工程，使读者对灵活交流输电装置工程示范所要涉及的技术内容有一个类似全景式的了解。只有更多的电力工作者了解、熟悉灵活交流输电，体会到灵活交流输电比常规交流输电的复杂性，充分肯定灵活交流输电所特有的技术优势后，灵活交流输电才能在我国真正得到较为广泛的推广应用。

电网和负荷快速发展的客观需求使故障电流限制器在近十多年中一直是学术研究和工程应用的热点之一。控制短路电流的方法有很多，故障电流限制器仅是诸多方法中的一个选项。然而，故障电流限制器的基本原理、材料组成、主电路拓扑、技术方案、控制保护策略等千差万别，论述故障电流限制技术及其最新研究成果仅限于一些零星发表的文章、论文和公开的技术报告，给相关电力工作者系统掌握故障电流限制技术的最新研究进展带来诸多不便。本书查阅了国内外大量的文章、学位论文、专著、标准、规程、规定、措施、技术报告、专利和技术说明书等，通过整理、归纳和总结，力求使读者在较短的时间内对故障电流限制技术有大致了解。这也是编者将不太熟悉的超导故障电流限制器编入本书的主要原因。

做过故障电流限制器调研工作的同行应深有感触，故障电流限制器种类太多，不知道哪个技术方案是最好的或者是接近最好的，尽管编者认为基于晶闸管阀保护串联电容器技术的串联谐振型故障电流限制器是一个非常有竞争力的解决方案，这虽有敝帚自珍之嫌，但没有排斥其他的解决方案，也愿意去了解其他的解决方案，同时也觉得读者应了解和熟悉其他的解决方案。这也是把示范工程之外的相关资料编入本书的原因之一。

美国电力科学研究院的相关研究报告表明，故障电流限制器有两个主流的发展方向，一是基于电力电子技术的故障电流限制器，另一个是基于超导技术的故障电流限制器。国内有学者提出非电力电子式、非超导式的故障电流限制器，并称之为“经济型”故障电流限制器。其实，采用常规电气元器件实现的故障电流限制器并不一定比基于电力电子技术的故障电流限制器经济。根据编者的调查结果，在用户对故障电流限制器的要求中排前三位的是占地小、可靠性高和成本低。但是到目前为止，还没有经济、可靠、占地又

小的最优故障电流限制器，因此，故障电流限制器还将继续成为学术研究和工程应用的热点之一。编者深知所做的工作是沧海一粟，本书也仅仅是一个阶段的工作总结，希望能够起到抛砖引玉的功效。

本书由武守远组织成立编委会，并确定本书的编写大纲；杨国庆和傅晨钊、刘之方编写 1.7 华东电网串联电抗器的经验；戴朝波和金雪芬编写 3.1 基于线路电流斜率的快速识别、3.2 基于线路电流瞬时值的快速识别和 3.3 基于 MOV 电流和 MOV 能耗的故障识别；申洪和项祖涛编写 4.2 选点及主参数选择、4.3 限流电抗快速接入及过电压保护控制、4.4 故障电流限制器阻尼回路设计和 4.6 对线路合闸操作过电压的影响；项祖涛编写 4.7 对线路断路器瞬态恢复电压的影响；鲍伟、傅晨钊、杨增辉、戴朝波和喻劲松编写 4.9 短路试验；袁洪亮和王宇红编写 4.5.1 晶闸管；董勤晓、刘之方、周玮和李志远编写 4.5.2 MOV 和 4.5.3 火花间隙；李志兵编写 4.5.4 旁路断路器；王宇红编写 5.1 UP 安普控制保护平台；金雪芬、戴朝波和王宇红编写 5.7 保护试验结果及分析；沈冰和鲍伟编写 5.8.1 对距离保护的影响、5.8.2 对差动保护的影响和 5.8.3 对方向性零序过流保护的影响分析；金雪芬、戴朝波、喻劲松和李志兵编写 5.8.4 重合闸对 FCL 的影响；戴朝波编写其他章节和前言，最后由戴朝波完成统稿。

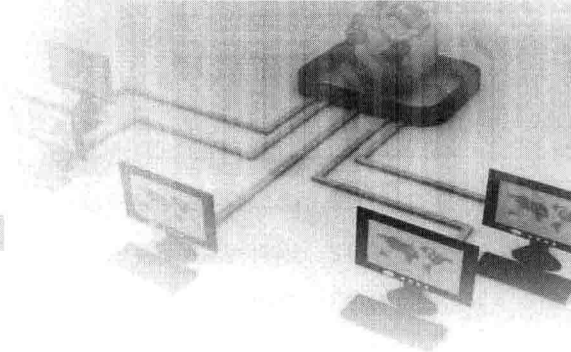
在编写过程中，中电普瑞科技有限公司的宋晓通博士、杨尚瑾、郑博文、谢炜、李欣、杨芬丽、杨京齐、李锦屏和中国电力科学研究院硕士研究生张浩、胡臻达等做了不少编辑和插图等辅助工作，在此一并表示由衷的感谢。中国科学研究院院士周孝信老师在示范工程实施过程中给过不少帮助，并作序推荐，在此深表谢意。中国电力科学研究院林海雪教授级高级工程师不但通读了本书的初稿，提出不少建设性的意见和建议，而且还欣然作序。在此对老一代科研工作者的关怀和支持，深表感谢。国网智能电网研究院电力电子研究所荆平所长在本书的编写过程中给过不少建议，在此表示感谢。山东大学的侯承昊硕士研究生和中电普瑞科技有限公司的郑博文帮助查找了大量的技术文献，在此表示感谢。中电普瑞科技有限公司郎平通读了全书，提出了许多修改意见，在此表示感谢。企业发展策划部的王巍、李子鸥、吴凤伶、王磊承担了部门的大量工作，使编者有时间去撰稿和统稿，在此表示感谢。此外，还要对本书所引用的文献、专著的作者表示谢意。

虽然经过反复多次修改，但限于编者水平有限，加之编写时间较为仓促，观点偏颇和内容疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。编者联系方式：chaobodai@qq.com。

**编 者**

2014 年 3 月

于北京昌平区未来科技城



# 目录

序一

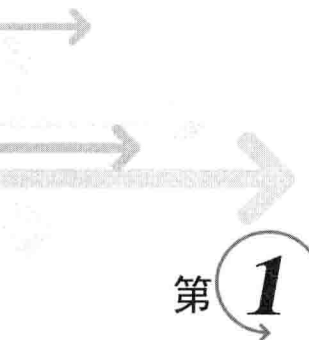
序二

前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....           | 1  |
| 1.1 短路故障与短路电流 .....      | 1  |
| 1.2 控制短路电流的方法 .....      | 2  |
| 1.3 故障限流技术的分类 .....      | 10 |
| 1.4 故障电流限制器 .....        | 11 |
| 1.5 超高压限流器的选择 .....      | 20 |
| 1.6 巴西的限流经验 .....        | 23 |
| 1.7 华东电网串联电抗器的经验 .....   | 27 |
| 第 2 章 故障电流限制器的技术原理 ..... | 34 |
| 2.1 限流式固态断路器 .....       | 34 |
| 2.2 并联限流阻抗型限流器 .....     | 36 |
| 2.3 零损耗深度限流器 .....       | 42 |
| 2.4 电弧电流转移型限流器 .....     | 44 |
| 2.5 两次电流转移型限流器 .....     | 45 |
| 2.6 负荷开关—熔断器组合限流器 .....  | 47 |
| 2.7 混合式熔断器故障电流限制器 .....  | 48 |
| 2.8 热敏电阻故障电流限制器 .....    | 56 |
| 2.9 液态金属限流器 .....        | 56 |

|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 2.10         | 并联谐振型限流器                 | 58         |
| 2.11         | 串联谐振型限流器                 | 60         |
| 2.12         | 串补型限流器                   | 66         |
| 2.13         | 全波整流桥式限流器                | 70         |
| 2.14         | 电压补偿型限流器                 | 71         |
| 2.15         | 磁饱和型限流器                  | 74         |
| 2.16         | 限流电抗可调型限流器               | 84         |
| <b>第 3 章</b> | <b>故障信号识别</b>            | <b>87</b>  |
| 3.1          | 基于线路电流斜率的快速识别            | 88         |
| 3.2          | 基于线路电流瞬时值的快速识别           | 102        |
| 3.3          | 基于 MOV 电流和 MOV 能耗的故障识别   | 104        |
| 3.4          | 基于线路电流波形曲率的快速识别          | 106        |
| 3.5          | 基于击穿二极管 (BOD) 启动阀旁路的故障识别 | 115        |
| 3.6          | 基于锁相环的故障识别               | 119        |
| 3.7          | 基于移相器的故障识别               | 123        |
| 3.8          | 基于线路电流定积分法的故障识别          | 126        |
| 3.9          | 基于人工神经网络的故障识别            | 128        |
| 3.10         | 基于瞬时有功功率的快速识别            | 132        |
| 3.11         | 基于模糊控制器的故障识别             | 135        |
| 3.12         | 基于线路电流瞬时值的变定值识别          | 135        |
| 3.13         | 三相平方和法                   | 136        |
| 3.14         | 移相法                      | 137        |
| 3.15         | 半波采样和法                   | 137        |
| 3.16         | 两采样点法                    | 138        |
| 3.17         | 最小二乘法                    | 139        |
| <b>第 4 章</b> | <b>超高压故障电流限制器示范工程</b>    | <b>140</b> |
| 4.1          | 概述                       | 140        |
| 4.2          | 选点及主参数选择                 | 143        |

|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 4.3   | 限流电抗快速接入及过电压保护控制····· | 154 |
| 4.4   | 故障电流限制器阻尼回路设计·····    | 167 |
| 4.5   | 主设备·····              | 176 |
| 4.6   | 对线路合闸操作过电压的影响·····    | 187 |
| 4.7   | 对线路断路器瞬态恢复电压的影响·····  | 190 |
| 4.8   | 电气布置与优化·····          | 206 |
| 4.9   | 短路试验·····             | 212 |
| 第 5 章 | 控制保护及其实时仿真·····       | 218 |
| 5.1   | UP 安普控制保护平台·····      | 218 |
| 5.2   | 限流器的控制保护装置·····       | 222 |
| 5.3   | 主要功能·····             | 224 |
| 5.4   | 平台测量系统·····           | 225 |
| 5.5   | 保护配置·····             | 227 |
| 5.6   | 实时仿真试验方案·····         | 228 |
| 5.7   | 保护试验结果及分析·····        | 231 |
| 5.8   | 与系统继电保护的配合·····       | 234 |
|       | 参考文献·····             | 244 |
|       | 索引·····               | 258 |



# 第1章

## 绪 论

### 1.1 短路故障与短路电流

由于电力系统的迅速发展,发电机和发电厂容量、变电站容量、城市和工业中心的负荷和负荷密度的持续增加,以及电力系统之间的互联,出现了一个新的突出问题,即现代大电力系统各级电网中的短路电流水平不断增加。例如,我国三大负荷中心(京津塘、长江三角洲、珠江三角洲)随着经济的快速发展,负荷和负荷密度急速增加。围绕着负荷中心大电源的投入更加快了短路电流水平的增长,系统中部分地区的短路电流已经达到甚至超过了断路器的遮断容量,而且上升趋势越来越快<sup>[1]</sup>。

短路电流的增加对电网的安全运行与管理是一把双刃剑。一方面,短路电流的增加可提高系统的暂态稳定性,在分析发电机的稳定性问题时使系统呈现较好的单机无穷大特性,使稳定分析与控制更加直观、简单;同时短路电流的增加可大大改善系统的电压特性,尤其是枢纽点电压不再轻易随负荷的波动而波动,为系统实施逆调压创造了有利条件<sup>[2]</sup>。另一方面,短路电流的不断增加会对电网的安全运行构成威胁,通常包括以下几个方面:

(1) 短路电流的不断增长可能使断路器因遮断能力不足而不能有效切除故障,断路器非但不能将系统故障快速有效地隔离,而且有可能使故障扩大蔓延,给断路器和系统的安全稳定运行带来灾难性的后果。

(2) 即使断路器的遮断能力足够,短路故障也会使短路点附近支路电流大幅度增加,超过电气设备额定电流几倍甚至几十倍的短路电流会使设备发

热增加，如果持续时间较长，电气设备可能因过热导致损坏。同时，短路电流的电动力效应会使导体间产生很大的机械应力，可能引起导体变形损坏，从而使事故进一步扩大。

(3) 短路故障会使系统电压大幅度下降。由于电动机的电磁转矩与电压的平方成正比，电压的下降会使其转速快速下降。当电压大幅度降低时，运转中的电动机可能停转，待启动的电动机可能无法启动，从而造成产品报废、设备损坏等后果。

(4) 短路故障会破坏系统的稳定运行。当短路发生地点离电源不远且持续时间较长时，可能使正常运行的发电机组失去同步，引发系统解列，造成大面积停电。这也是短路故障最严重的后果。

(5) 为满足线路的热动稳定要求，迫使电力系统选用重型电气设备，使电网建设的经济性明显下降。

(6) 发生接地故障时，由于注入大地的电流过大而产生强大的地电位反击，使接地点附近的变电站安全乃至人身安全受到严重威胁。

(7) 不对称故障会对高压电力线路附近的通信线路或铁道信号系统产生严重的干扰，因为不对称短路时的不平衡电流产生的磁通会在邻近平行架设的通信线路上感应出很大的电动势，严重时会造成通信设备故障。

为解决短路电流超标问题，一方面需加强和更换电网内各种电气设备，如断路器、变压器、互感器、母线、绝缘子等，但短路电流超标的变电站一般为枢纽变电站，需更换的断路器数量众多，且所有一次通流设备以及接地网等也需更换。尽管更换断路器等设备对电网的运行特性无影响，但其投资大、工期长，并使电网枢纽变电站长期处于非正常运行方式。另一方面需寻求控制短路电流的途径。

## **1.2 控制短路电流的方法**

### **1.2.1 统一规划电网**

短路电流与系统结构、电源的接入方式等密切相关，无论是电网结构还是电源的接入方式，都是电网规划的重要内容。系统一旦建成，短路电流水平基本确定，若要降低短路电流水平，或需巨大的投资，或需在运行方式上

做出一定牺牲。因此，完全可以认为系统短路电流是电力系统的一个自然属性或是一种资源，而且是极为有限的资源，必须纳入统一规划<sup>[2]</sup>。

控制短路电流的方法多种多样，但最根本、最有效的方法是电网规划，如可按照电网规划的一般原则“电网跟着负荷走，电源跟着电网走”来控制短路电流。控制短路电流绝不仅仅是电网一方的责任，电网在接入电源时要考虑接入点短路电流的限制，电源也要为控制电网短路电流承担相应的责任。在电力市场进一步发展以后，甚至可将电网短路电流作为资源将其市场化，由市场决定并分摊某一地区控制短路电流的成本。由于系统是交流互联的，一个地区的短路电流决非本地区自身所能完全决定，因此区域电网公司或更高的国家电网公司在协调各地区的短路电流控制方面将发挥更大的作用，而这些作用只能也必须从规划抓起<sup>[2]</sup>。

当分布式电源接入到配电网时，原有配电网络的结构发生了变化。当配电网发生短路故障时，除了系统向故障点提供故障电流外，分布式电源也将对故障点提供故障电流，流经故障点的故障电流将增大。为规范分布式电源的并网，也为通过统一规划来控制短路电流，国家电网公司在企业标准《城市电力网规划设计导则》<sup>[3]</sup>中规定了不同容量的分布式电源并网的电压等级。

### 1.2.2 确保电网稳定

电网的短路电流水平直接决定该电网的整体稳定水平。我国在控制电网稳定性方面的一条重要经验是建设坚强的受端系统，即加强和逐步扩大相邻主要负荷集中地区（包括电源）内部和它们之间的网络联结，以减小受端系统的电源阻抗，使受端系统主网的电压母线维持一定的短路电流水平，在振荡时该母线电压不至于过低。为此，要求地区主力电源一般直接接入主网。这些原则在1981年水利电力部颁发的《电力系统安全稳定导则》中作了详细的规定与说明。

在电网发展初期，暂态稳定问题比较突出，在一定程度上保持甚至逐步提高短路电流水平是完全必要的。但当稳定水平提高到一定程度后，通过提高短路电流水平来提高电网稳定性就不再十分有效了。如上海电网的暂态稳定水平自20世纪90年代中期就发生了根本性变化，主要呈现出以下一些特点：一是在主保护可靠动作的情况下，电网可承受任何一处三相永久故障；二是正常方式下电网潮流一般不再受暂态稳定极限的制约，而只取决于电气

设备的热稳定极限。由此可见,暂态稳定问题在上海电网中已不再是限制电网运行方式的主要矛盾。2005年,上海电网的暂态稳定性进一步提高,主网(220kV)任何一处三相短路故障的极限切除时间都已大于0.2s,因此,可认为上海电网已具备通过一定手段控制短路电流的条件<sup>[2]</sup>。

### 1.2.3 采用适当的电压调节手段

我国电力系统采取分层分区平衡的原则配置无功补偿装置,因此,理论上在最优状态下500kV系统与220kV系统没有无功功率交换,但实际上却很难做到。为协调电网中的各种无功功率调节与电压控制手段,从运行安全性与经济性方面考虑,需要超高压系统提供电压参考作为全系统电压的基础。如在法国电力系统中,电压控制采用主导节点控制模式,即根据主导节点上测得的电压变化修正控制机组电压调节器的整定值以控制机组的运行状态。为此,要求主导节点的电压变化对于全控制区具有代表性,即当主导节点电压保持不变时,负荷在允许的变化区内变化,各变电站的电压变化也不大,这样的主导节点优先选取区内短路电流水平最高的变电站。由超高压系统提供电压参考的控制思路在500kV系统的短路电流水平远低于220kV系统的短路电流水平时很难实施。最直接的例子是很难通过调整500kV联络变压器分接开关来控制220kV母线电压,此时,提高500kV系统的短路电流水平、通过分层分区降低220kV系统的短路电流水平是完全合理的,有益于加强全系统的电压控制<sup>[2]</sup>。

### 1.2.4 采用合理的电源接入方式

#### 1.2.4.1 主力电厂的并网原则

SD 131—1984《电力系统技术导则》<sup>[4]</sup>第5章对电源的接入方式有明确的规定:“一定规模的电厂或机组,应直接接入相应一级的电压电网。在负荷中心建设的主力电厂宜直接接入相应的高压主网。单机容量为500MW及以上的机组,一般宜直接接入500kV电压电网。”

DL 755—2001《电力系统安全稳定导则》<sup>[5]</sup>在讨论电源的接入方式时再次强调:“在经济合理与建设条件可行的前提下,应注意在受端系统内建设一些容量较大的主力电厂,主力电厂宜直接接入最高一级电压电网。”

在500kV电网的发展初期,这些规定和要求对尽快加强500kV网架、充分发挥500kV网架的功能发挥了积极作用。此外,大机组尽可能接入最高