国际电气工程先进技术译丛

WILEY

高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用

HVDC TRANSMISSION: Power Conversion Applications in Power Systems

（韩国） Chan-Ki Kim
（加拿大） Vijay K. Sood
（韩国） Gil-Soo Jang 著
（韩国） Seong-Joo Lim
（韩国） Seok-Jin Lee
徐政 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于作者

Chan-Ki Kim：韩国电力公司，韩国电力研究院

Vijay K. Sood：加拿大安大略理工大学

Gil-Soo Jang：韩国高丽大学

Seong-Joo Lim：韩国电力公司

Seok-Jin Lee：韩国电力公司

在当今大规模可再生能源开发环境下，高压直流输电为解决系统互联和供电质量中的重大技术问题提供了关键性的技术方案。高压直流输电可以解决多个重大技术问题，包括交流电网的电压稳定性、短路电流超限、电能的最优管理等，从而将会在电力工业中起到越来越重要的作用。

为了对直流输电领域有一个最新而全面的介绍，Kim、Sood、Jang、Lim和Lee五位作者合作写作了本书。本书将课堂教学和工程试验的相关材料结合起来，对直流输电的最新研究成果进行了总结，从基本理论到实际应用，从历史沿革到未来发展，包括了电力系统、电力电子和系统仿真方面的技术内容。



国际电气工程先进技术译丛

高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用

HVDC TRANSMISSION: Power Conversion Applications in Power Systems

(韩国) Chan – Ki Kim
(加拿大) Vijay K. Sood
(韩国) Gil – Soo Jang 著
(韩国) Seong – Joo Lim
(韩国) Seok – Jin Lee
徐 政 译

机 械 工 业 出 版 社

本书对直流输电的基本理论和工程应用进行了全面的介绍，包括换流器的工作原理、谐波及其消除、直流输电系统的控制和保护、主电路设计、绝缘配合、交直流系统相互作用、高压直流输电系统的建模与仿真。

本书适于从事高压直流输电技术研究、开发、应用的技术人员和电力系统科研、规划、设计、运行的工程师，以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。

Copyright ⓒ John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems >, ISBN: 978-0-470-82295-1, by Chan-Ki Kim, Vijay K. Sood, Gil-Soo Jang, Seong-Joo Lim and Seok-Jin Lee, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

本书版权登记号：图字 01-2010-3818 号

图书在版编目（CIP）数据

高压直流输电：功率变换在电力系统中的应用/（韩）金昌起等著；徐政译. —北京：机械工业出版社，2014.1

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems

ISBN 978-7-111-45481-6

Ⅰ.①高… Ⅱ.①金…②徐… Ⅲ.①高电压-直流输电 Ⅳ.①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 011036 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：付承桂 责任编辑：付承桂

版式设计：霍永明 责任校对：肖 琳

封面设计：马精明 责任印制：乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2014 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 25.25 印张 · 516 千字

0 001— 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-45481-6

定价：98.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务		网络服务	
社服务中心：	(010)88361066	教材网：	http://www.cmpedu.com
销售一部：	(010)68326294	机工官网：	http://www.cmpbook.com
销售二部：	(010)88379649	机工官博：	http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：	(010)88379203	封面无防伪标均为盗版	

译 者 的 话

西电东送是保障我国能源供应的必然选择，而直流输电以其在大容量、远距离输电方面的优势实际上已成为实施西电东送的主要技术手段。我国已经是世界上直流输电工程最多的国家，未来10年还将建设超过20项直流输电工程。尽管我国在直流输电技术方面已居世界领先地位，但众多的直流输电工程需要大量从事规划、设计、制造、施工和运行的工程技术人员，如何快速高效地培养我国下一代的直流输电技术人员是目前面临的一个重大任务。

本书主要由韩国工程师编写，主要从直流输电工程设计和运行的角度对直流输电的相关问题展开论述。本书内容广泛，几乎涉及了直流输电的所有领域以及在设计和运行中所关注的主要问题。相对于直流输电技术在我国电力系统中的重要性和应用的广泛性，关于直流输电工程技术方面的中文书籍仍然偏少，因此译者历时三年将本书翻译出来，希望本书能够为我国直流输电方面的人才培养做出贡献。

本书的翻译得到了国家863计划项目“智能电网关键技术研发（一期）”课题19（课题编号：2011AA05A119）的资助。翻译过程中王珅、许烽、陈鹤林、刘昇、李娜、游沛宇、邱一苇、金楚、张君宇、黄翔、黄文滔、陈超、邢佳丽、邓晨成等同学做了大量工作，在此深表谢意。原书中一些明显的笔误或印刷错误，改正以后并未加以说明。限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：电话（0571）87952074，电子信箱 xuzheng007@zju.edu.cn。

徐　政

2013年11月

于浙江大学求是园

原 书 序 言

十年前韩国的第一个直流输电工程，从本土的韩楠到济州岛的直流输电工程投入运行，为韩国电力工业做出了极其重要的贡献。将来，诸如系统间的联网以及大规模可再生能源的质量等将成为关键性的问题，高压直流输电在解决这些关键性问题时将起到决定性的作用，我很自豪自己能投身于此项事业。

本书概述了高压直流输电的相关技术，是本领域的重要资源。在如此短的时间内写出如此长篇幅的著作，需要花费巨大的精力。

对于电力工业，我们必须承认化石燃料会不可避免地耗尽，而环境保护意识将变得越来越重要。就这点而论，电能相比于煤炭、石油和天然气在效率、经济性和清洁性方面具有多种优势。高压直流输电可以解决多方面的问题，包括交流电网中的电压稳定性，不断增长的短路电流水平以及备用容量的增加等。显然，高压直流输电在未来的电力工业中会起到关键性的作用。

十分重要的一点是，对于高质量供电要求和大规模可再生能源接入电网问题，高压直流输电是最有效的解决方案。

本书包含了从直流输电基本理论到高级应用的多个方面的内容，并且都在世界著名专家的指导下完成。毫无疑问，这是高压直流输电领域的最好著作之一。科学没有国界，我相信本书对世界范围的电力工作者都是有用和有益的。

我真诚地希望本书的作者继续致力于直流输电领域的进一步研究。

我突然想起以前我担任韩国电力研究院院长时一起工作的同事，他们对研究工作十分执着，不知疲倦，在他们的办公桌上有这么一句口号，我是完完全全相信的，这句口号是：

高压直流输电将会给这个世界带来福利和进步！

韩国电力公司输电部副总裁

Kim Moon – Duk

原书前言

虽然高压直流输电在一些人看来是一项成熟技术，但令人惊异的是还有很多的研究领域和很多的工程正在酝酿中。由于既有系统的互联和新技术的应用，电力系统的复杂性正在不断增加。经济上和其他方面的限制正迫使电力公司将它们的电力系统运行在接近稳定极限处，从而以最小的成本来供给可靠而清洁的电能。在发展中国家，如中国、印度和巴西，不断增长的对电能的需求要求高压直流输电承担大容量远距离的输电任务。而希望电网互联并提供更高灵活性的发达国家，则主要依赖背靠背直流输电。此外，将可再生能源接入电网的兴趣也越来越大，再次要求采用直流输电。似乎为了解决上述问题，采用高压直流输电技术是必需的。

直流输电的历史始于1897年，当时Thomas Edison成功实现了基于低压直流的供电和用电。在那个时代，电力工业的标准还没有形成，直流输电和交流输电的技术竞争还非常激烈，交流输电通过变压器实现，由George Westinghouse提出。

后来，人们认识到了电力的重要性，因而就需要进行大规模的发电和输电。由于交流技术在发电、输电、变换和可靠性方面的优势，它成为了电力工业的骨干。另一方面，20世纪30年代开发出汞弧阀以后，直流输电重新获得了重视。高压直流输电的首次商业化运行是在1954年，通过海底电缆从瑞典本土向Gotland岛送电。

高压直流输电独一无二的特性使得这项技术在特定的应用领域具有巨大的生命力。20世纪70年代初期，晶闸管阀的出现大大推进了高压直流输电的应用，使可靠性大为提高而成本大为下降；90年代，大功率强制换相开关的实用化也大大促进了高压直流输电的应用。今天，高压直流输电系统已经信誉卓著，它与柔性交流输电系统（FACTS）并肩为电力输送提供复杂而万能的模式。但是，新的应用总是在不断地被开发出来，因此，持续地对高压直流输电技术进行研发并使新的研究者和工程师继续了解这项技术是十分重要的。然而，我们发现此领域的文献经常是短缺的，特别是系统全面的文献资料。为此，我们感到，从事实际工作的工程师应当将他们的专长加入到专门的知识库中，以方便下一代工程师的工作。

韩国电力公司（KEPCO）正积极开展东北亚地区国内外的电力互联项目。与此项目相关的具有多年实际工程经验的工程师们集合起来准备了这本书。这本书是这些工程师从事济州岛—韩楠直流输电工程第一手知识的结晶，结合了基本原理和实际技巧，这些在其他地方是得不到的。

第1章和第2章对高压直流输电进行了介绍并描述了换流器的基本元器件，是高压直流输电的最基本部分。此外，还描述了换流站无功功率的补偿方法和高压直

流输电系统的仿真方法。

第3~5章描述了用于去除谐波的滤波器的类型以及用于交流滤波器设计的系统阻抗的特性。此外还描述了晶闸管相位控制的基本方法——分相控制（IPC）方法、等间隔脉冲控制（EPC）方法和直流输电系统的控制方法。

第6~8章描述了高压直流输电系统主电路的设计技术，包括晶闸管换流器、换流变压器、平波电抗器、架空线路、电缆线路、接地极和背靠背换流器。

第9章和第10章对直流输电和交流输电进行了比较，涉及输送容量、环境影响、经济性等多个方面。基于电力输送的实际应用，全面描述了高压直流输电技术世界范围的当前状态和未来发展趋势。

本书还有一些有用的补充性资料，可以在本书相对应的网页 http://www.wiley.com/go/hvdc 上找到。

我们真诚希望本书能够为直流输电的文献库增加材料，我们当然知道，尽管我们试图将其他地方难以得到的关于实际工程的知识写出来，但要覆盖此项技术的所有领域是不可能的。

Chan – Ki Kim
Vijay K. Sood
Gil – Soo Jang
Seong – Joo Lim
Seok – Jin Lee

所用符号列表

$1/N$	匝数比
α	触发延迟角
βC	β 控制
γ	关断角
γC	γ 控制
v_c@	换流器的@ – 相电压
ρ_0	导体内半径处纸的电阻率
ω_G	发电机转子速度
A	极间距离
AC	交流
AG	放大门
AVR	自动电压调节
BC	母线连接
BOD	击穿二极管
C	换相结束后的恢复电压
CC	电流控制；定电流
CCC	电容换相换流器
CEA	定关断角
CFO	临界闪络电压
CP	连接管道
CSCC	可控串联电容换流器
CT	电流互感器
CTC	连续换位导体
d	单根导体的直径；绞线的直径
D	分裂导线的直径
D'	串联电容减小的换相角的函数
D_e	电气阻尼
D_m	机械阻尼
E_{FL}	额定电压
E_{max}	最大表面梯度
EPC	等间隔脉冲控制

ESCR	有效短路比
ESDD	等值盐密
F	触发开始换相
f_0	基波频率（60Hz）
F_0	无线电干扰（场强）
F_{demand}（Hz）	频率指令值
F_{order}（Hz）	频率输出值
f_t	扭振模式
H	热管
H	导线高于地面的平均高度
H_C	接触强度，其中 m/σ 表示粗糙度
I_1	基波电流
I_d	恒定值；直流电流
I'_d	新增加的直流电流
I_{DC}	直流电流水平
I_{dFL}	额定电流
I_{dN}	额定电流（A）
I_{hCCC}	CCC – HVDC 系统中的谐波量
I_{hCon}	常规 HVDC 系统中的谐波量
I_{order}	从功率控制来的电流指令值
I_{s*}	* 相电流
i_A	浪涌电流
ILED	红外发光二极管
i_N	跟踪电流
IPC	分相控制
i_S	控制电流
IVIL	逆变器阀绝缘水平
K_S	谐波热传导系数
L_d	直流侧电感（H）
L_s	换流器输入端电感
LCC	电网换相（电流源）换流器
LI	雷电冲击
LIWL	雷电冲击水平
LTT	光触发晶闸管
m	每束分裂导线的根数
MVA	决定于下标的额定值

n	整数；每束分裂导线的根数
N_p	保证的保护水平
NV	中性线电压
OCT	光学电流互感器
OSCR	运行短路比
P	接触压力
P_c	电晕损耗（每极，kW/km）
P_d	直流功率
P_{order}	直流功率指令
P_{dc}	直流功率（MW）
PFC	脉冲频率控制
PPC	脉冲相位控制
PSS	电力系统稳定器
Q	热量传递
Q_F	中性点接地的包括滤波器的无功补偿总量（MVA）
QESCR	Q 有效短路比
R	分裂导线等效半径
r_0	电缆导体半径
Rb	旁路电阻器
RH	相对湿度
RS	SSDC 输出信号
RS	均压电阻器
RVIL	整流器阀绝缘水平
s	分裂导线中各子导线间的距离
S	导线之间的距离
S_N	中性点接地的 Y－D 联结换流变压器总容量（MVA）
S_n	变压器容量 = $\sqrt{3}U_{1n}I_{1n}$
S_{SC}	短路水平（MVA）
SC_{TOT}	包括第 i 台机组的换流母线短路容量
$\overline{SC_i}$	排除第 i 台机组的换流母线短路容量
SCR	短路比
SI	操作冲击
SIWL	操作冲击水平
Slope（% droop）	系统的速度调差特性
SSDC	次同步阻尼控制
SSO	次同步振荡

T_A	环境温度
T_e	发电机电磁转矩
T_J	半导体结温
T_a	空气温度
T_d	露水的温度
TOV	暂时过电压
U	导体 – 大地电压（kV）
U	避雷器组工作电压
U_1	基波电压
U_d	线对地电压
U_{dN}	HVDC 每极额定直流电压（kV）
U_a	闪络电压
UIF_i	第 i 台机组的机组作用系数
U_L	熄弧过程中的弧电压
U_p	转换过程中的剩余电压
U_{R_a}	熄弧过程中电阻 R_a 上的电压降
U_s	冲击电压
V_1	正常运行条件下包括动态过电压的运行电压峰值
V_2	VBO 检测水平
V_3	晶闸管重复导通电压
V_4	考虑不平衡因素的避雷器每个元件保护水平
V_5	晶闸管非重复性导通电压
V_d	逆变器直流电压
V_{d0}	换流桥空载电压
V_{dc}	直流电压值
V_k	阻抗电压
V_L	交流端电压
V_m	换流变压器网侧相电压有效值
VBE	阀基电子设备
V_c	换相恢复过电压毛刺
VC	电压控制
VCO	压控振荡器
VSC	电压源换流器
VSF	电压灵敏度因子
V_w	风速（m/s）
x	漏抗（pu）

X	SSDC 输入信号；导线到边的距离
X_1	换流变压器漏抗（pu）
X_C	换相电感
Z_0	交流电网零序阻抗
Z_1	交流电网正序阻抗
ZFCT	零磁通电流互感器

目　　录

译者的话
原书序言
原书前言
所用符号列表

第 1 章　HVDC 技术的发展 …… 1

1.1　引言 …… 1
1.2　HVDC 系统的优势 …… 2
1.3　HVDC 系统的成本 …… 7
1.4　HVDC 系统的结构概述 …… 12
1.5　HVDC 系统可靠性概述 …… 20
1.6　HVDC 系统的特性和经济性 …… 27
参考文献 …… 30

第 2 章　功率变换 …… 32

2.1　晶闸管 …… 33
2.2　三相换流器 …… 41
2.3　三相全桥换流器 …… 47
2.4　12 脉波换流器 …… 51
参考文献 …… 54

第 3 章　高压直流输电系统的谐波及滤波 …… 55

3.1　概述 …… 55
3.2　确定合成的谐波阻抗 …… 70
3.3　有源滤波器 …… 76
参考文献 …… 82

第 4 章　高压直流换流器和系统的控制 …… 84

4.1　高压直流输电系统中的换流器控制 …… 84
4.2　换相失败 …… 96
4.3　高压直流输电系统的控制及其设计 …… 101

4.4　高压直流输电系统控制功能 …… 113
4.5　无功功率与电压稳定性 …… 120
4.6　总结 …… 128
参考文献 …… 128

第 5 章　交流系统与直流系统之间的相互作用 …… 130

5.1　短路比和有效短路比的定义 …… 130
5.2　高压直流系统与交流系统之间的相互作用 …… 139
5.2.1　高压直流系统与交流系统之间的相互作用 …… 139
5.2.2　高压直流输电系统与发电机之间的相互作用 …… 144
5.2.3　HVDC 系统与 FACTS 装置之间的相互作用 …… 154
5.2.4　HVDC 系统与 HVDC 系统之间的相互作用 …… 158
参考文献 …… 161

第 6 章　主电路设计 …… 163

6.1　换流器的电路和元件 …… 163
6.2　换流变压器 …… 169
6.3　冷却系统 …… 174
6.4　高压直流输电架空线路 …… 186
6.5　高压直流输电接地极 …… 200
6.6　高压直流电缆 …… 205
6.7　高压直流输电的通信系统 …… 213
6.8　电流互感器 …… 218
6.9　高压直流系统的噪声和振动 …… 220
参考文献 …… 224

第 7 章　高压直流输电系统的故障特性和保护措施 …… 226

7.1　阀的保护功能 …… 226
7.2　高压直流输电系统的保护行为 …… 230
7.2.1　交流侧保护 …… 230
7.2.2　直流侧保护 …… 230
7.3　由控制行为构成的保护 …… 235
7.4　故障分析 …… 241
参考文献 …… 243

第 8 章 高压直流输电系统的绝缘配合 …… 244

8.1 避雷器 …… 244
8.2 高压直流换流站内避雷器的功能 …… 247
8.3 济州岛高压直流系统的绝缘配合 …… 253
8.3.1 阀避雷器保护水平的确定 …… 256
8.3.2 上桥避雷器保护水平的确定 …… 256
8.3.3 中性点避雷器保护水平的确定 …… 256
8.3.4 中性母线避雷器保护水平的确定 …… 256
8.3.5 接地极引线避雷器保护水平的确定 …… 257
8.3.6 直流母线避雷器保护水平的确定 …… 257
参考文献 …… 257

第 9 章 高压直流输电系统的一个实际例子 …… 258

9.1 引言 …… 258
9.2 系统描述 …… 265
9.2.1 主控制 …… 265
9.2.2 极控制 …… 265
9.3 相位控制 …… 267
参考文献 …… 287

第 10 章 高压直流输电的其他换流器结构 …… 288

10.1 引言 …… 288
10.2 电压源换流器（VSC） …… 288
10.3 CCC – HVDC 系统和 CSCC – HVDC 系统 …… 298
10.4 多端直流输电系统 …… 306
参考文献 …… 313

第 11 章 高压直流输电系统的建模与仿真 …… 315

11.1 仿真的范围 …… 315
11.2 用于精确仿真的快速方法 …… 319
11.3 高压直流输电系统的建模与仿真 …… 323
11.4 济州岛 – 韩楠 HVDC 实时数字仿真器 …… 327
参考文献 …… 335

第 12 章　已建的和计划建设的 HVDC 工程 …… 337

12.1　北美地区 …… 337
12.2　日本 …… 342
12.3　欧洲 …… 343
12.4　中国 …… 351
12.5　印度 …… 352
12.6　马来西亚/菲律宾 …… 353
12.7　澳大利亚/新西兰 …… 354
12.8　巴西 …… 355
12.9　非洲 …… 357

第 13 章　HVDC 应用的趋势 …… 359

13.1　风电场技术 …… 359
13.2　现代电压源换流器（VSC）型 HVDC 系统 …… 368
13.3　800kV 高压直流输电系统 …… 376
参考文献 …… 384