



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

014034537

TM726.1

25

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

TM726.1
25

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

0001—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大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

VI 高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用

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 |
| β_C | β 控制 |
| γ | 关断角 |
| γ_C | 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 |
| 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 |

第 1 章 HVDC 技术的发展

1.1 引言

高压直流 (HVDC) 输电系统的发展可以追溯到 20 世纪 30 年代发明汞弧整流器的时候。1941 年, 订立了第一个商业化应用的 HVDC 输电系统的合同, 即将 60MW 功率通过一条长度为 115km 的地下电缆送往柏林城。1945 年, 该系统已准备投运, 但由于二战结束后该系统被拆除, 因而该系统从来就没有投运过。直到 1954 年, 第一个 HVDC (10MW) 输电系统在 Gotland 岛投运。从 20 世纪 60 年代开始, HVDC 输电系统已成为一种成熟技术, 而且在长距离输电和大系统联网两方面发挥了至关重要的作用。

HVDC 输电系统一旦安装完成, 经常成为电力系统的骨干网架, 具有使用寿命长和可靠性高等优势。HVDC 输电系统的核心部件是功率换流器, 用于与交流系统相接口。通过三相桥式换流器中的可控电子开关 (阀), 可以达到将交流变成直流或者反过来将直流变成交流的目的。

HVDC 系统避免了交流输电的一些缺点和局限, 具有如下优势:

- 1) 技术上对海底电缆输电的长度没有限制。
- 2) 不要求被连接的系统同步运行。
- 3) 不增加交流开关装置上的短路容量。
- 4) 不受阻抗、相位、频率或电压波动的影响。
- 5) 仍然保持频率和发电机控制的独立性。
- 6) 根据频率、功率振荡或线路负载水平对直流功率进行调制, 可以提高交流系统的稳定性, 从而提升系统内线路的输电能力。

图 1-1 列举了 HVDC 输电系统的应用实例, 其中标号的意义如下:

- ①—大功率远距离架空线路输电。
- ②—通过海底电缆的大功率输电。
- ③—通过对 HVDC 输电线路或背靠背直流输电系统上的功率进行快速和精确的控制, 或者对输电功率进行调制, 用以产生对机电振荡的正阻尼, 从而提高电力系统的稳定性。

④—由于 HVDC 系统对所连接的两个交流系统的频率和相位没有限制, 它可以采用背靠背的方式非同步连接两个不同频率的交流系统。

⑤—当电力需要从偏远的发电站跨越一个国家的不同地区或者跨国进行远距离