



国际电气工程先进技术译丛

WILEY



IEEE

# 气体绝缘输电线路

Gas-Insulated Transmission Lines

[德] 赫曼·科赫 (Hermann Koch) 著

沈威 杨思民 杨建军 译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

# 气体绝缘输电线路

Gas - Insulated Transmission Lines

[德] 赫曼·科赫 (Hermann Koch) 著  
沈 威 杨思民 杨建军 译



机械工业出版社

气体绝缘输电线路(GIL)通常用于如水电站和核电站以及其他场所的大容量输电。本书通过对 GIL 技术、经济 and 环境影响以及电力系统应用的分析,提供了该技术在设计、特性及优点方面完全的阐述。本书对输电系统的规划、设计和执行的工程师来说是基本的参考资料,对全球范围的用户工程师、咨询工程师以及制造商都提供了完美的帮助。

Copyright © 2012 John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Gas - Insulated Transmission Lines, ISBN 9780470665336, by Hermann Koch, 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

本书原版由 Wiley 公司出版,并经授权翻译出版。

版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译出版授权机械工业出版社独家出版,并限定在中国大陆地区销售。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Wiley 公司的防伪标签,无标签者不得销售。

本书北京市版权局著作权合同登记图字:01-2013-5544 号。

## 图书在版编目(CIP)数据

气体绝缘输电线路/(德)赫曼·科赫(Hermann Koch)著;沈威,杨思民,杨建军译. —北京:机械工业出版社,2016.8

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Gas - Insulated Transmission Lines (GIL)

ISBN 978-7-111-54885-0

I. ①气… II. ①赫…②沈…③杨…④杨… III. ①气体绝缘-输电线路 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 222685 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:张俊红 责任编辑:赵玲丽

责任校对:刘 岚 封面设计:马精明

责任印制:常天培

涿州市星河印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 16 印张 · 324 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-54885-0

定价:99.00 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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

# 译者序

科赫博士在西门子能源管理集团输电解决方案部门负责技术与创新工作，在国际电工委员会（IEC）第17C分技术委员会担任秘书。2004年中国电力企业联合会成立了电力行业标准“气体绝缘金属封闭输电线路技术条件”工作组，科赫博士参加了这个工作组并陪同工作组成员参观了在瑞士日内瓦机场展览中心的气体绝缘输电线路（GIL）运行现场。在他的积极参与下，中国第一个GIL标准——DL/T 978—2005《气体绝缘金属封闭输电线路技术条件》于2005年正式发布。

科赫博士还担任国际大电网会议（CIGRE）“GIL在长距离大容量结构的应用”工作组B3/B1.09的召集人，同时他也在美国电气电子工程师学会（IEEE）电力和能源学会（PES）电站委员会主持气体绝缘变电站的培训工作，迄今他已在美国、加拿大、南美及印度等20多个国家开展了培训。

GIL技术具有输送容量大、可靠性高、电容量小、损耗低、过载能力强、免维护、无老化现象、环境友好等优点，由于这些优点，自该技术问世以来已经有300多公里的GIL在世界各地投入运行。GIL技术的发展也促进了国际标准、国家标准和行业标准的制定。IEC第17C分技术委员会在1998年出版了技术报告：IEC 61640《额定电压72.5kV及以上刚性高压气体绝缘输电线路》；我国国家发展和改革委员会于2005年发布了中国电力行业标准：DL/T 978—2005《气体绝缘金属封闭输电线路技术条件》；国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会于2008年发布了国家标准：GB/T 22383—2008《额定电压72.5kV及以上刚性气体绝缘输电线路》；IEC第17C分技术委员会在2011年出版了国际标准：IEC 62271-204《额定电压52kV及以上刚性气体绝缘输电线路》。

近些年来中国电力工业的发展也给GIL技术的应用提供了很多机会，大亚湾、岭澳核电站，拉西瓦、锦屏、溪洛渡水电站等电站的送出工程相继使用了GIL技术。随着社会各界对可靠性以及环境的要求越来越高，会有更多的工程需要使用GIL技术，因此我们决定把这本书翻译成中文，以便于国内设计、制造以及运行部门的工程技术人员以及大专院校的学生参考。本书第1~3章由沈威翻译，第4~6章由杨思民翻译，第7~10章由杨建军翻译。

译者

# 原 书 序

电力输送的传统方式是采用架空线，但是在一些环境有限制的场合就需要采用地下输电线的解决方案。现今已经有一些地下输电线的方案，其中最普遍的就是电缆，然而气体绝缘输电线路（Gas - Insulated Transmission Lines, GIL）也是一种经常用到的解决方案。GIL 可以直接埋入地下，也可以敷设在隧道中或户外构架上。由于直埋式 GIL 可以和景观很好相处，因此可以得到数千米甚至数十千米的连续敷设应用。GIL 有很多优点，包括载流能力强、损耗低、电容量低等。

虽然 GIL 技术主要来自于气体绝缘开关设备的经验，但还是有很多诸如设计、安装和维护方面的特性和规范需要考虑。赫曼·科赫从事这个专业达 20 年之久，他写的这本书给这个技术作了非常全面的论述，该技术自 20 世纪 70 年代开始代替电缆并得到越来越广的应用。第一代 GIL 技术使用纯 SF<sub>6</sub> 气体和法兰连接技术，第二代 GIL 技术使用 SF<sub>6</sub> 和 N<sub>2</sub> 的混合气体以及导体和外壳的焊接连接技术。本书介绍了 GIL 的绝缘特性和设计特点，也介绍了现场装配和敷设方式以及质量保证和试验手段，包括诊断工具。对不同敷设方式的特别要求也提出考虑。对系统、网络、环境及经济性也都提出了考虑。本书最后对世界各地的 GIL 应用作了图解说明并对 GIL 与其他输电系统作了技术、经济、现场以及美学、隐形和噪声等软特性作了比较。

本书对当前从事系统布置的工程技术人员很有益处，对电力系统专业的学生也有帮助，对希望了解地下输电技术的读者也提供了丰富的信息。

克劳斯·诺伊曼教授  
于德国埃森

# 目 录

## 译者序 原书序

## 第 1 章 前言 ..... 1

- 1.1 电力供应的发展 ..... 1
- 1.2 GIL 的优点 ..... 3

## 第 2 章 历史 ..... 5

- 2.1 电网的发展 ..... 5
  - 2.1.1 总论 ..... 5
  - 2.1.2 输电级别 ..... 6
  - 2.1.3 长距离输电 ..... 7
  - 2.1.4 输电网的额定电流 ..... 11
  - 2.1.5 输电网发展的结论 ..... 11
- 2.2 GIL 的发展史 ..... 12
  - 2.2.1 第一代 GIL ..... 12
  - 2.2.2 第二代 GIL ..... 16
  - 2.2.3 全球范围的经验 ..... 23

## 第 3 章 技术 ..... 25

- 3.1 气体绝缘 ..... 26
  - 3.1.1 自由气体空间 ..... 27
  - 3.1.2 绝缘件 ..... 28
  - 3.1.3 气密外壳 ..... 28
  - 3.1.4 绝缘气体 ..... 29
- 3.2 基本设计 ..... 43
  - 3.2.1 概论 ..... 43
  - 3.2.2 由绝缘确定的尺寸 ..... 46
  - 3.2.3 由发热确定的尺寸 ..... 46
  - 3.2.4 绝缘配合 ..... 46
  - 3.2.5 电气优化 ..... 46
  - 3.2.6 输电网的研究 ..... 47

- 3.2.7 由气体压力确定的尺寸 ..... 47
- 3.2.8 高压设计试验 ..... 48
- 3.2.9 额定电流设计 ..... 49
- 3.2.10 额定短路电流设计 ..... 49
- 3.2.11 内部电弧设计 ..... 50
- 3.2.12 电动力设计 ..... 51
- 3.2.13 机械设计 ..... 52
- 3.2.14 一体化的过电压保护 ..... 52
- 3.2.15 颗粒 ..... 53
- 3.2.16 发热设计 ..... 53
- 3.2.17 抗震设计 ..... 58
- 3.3 产品设计 ..... 62
  - 3.3.1 技术参数 ..... 62
  - 3.3.2 导体管 ..... 64
  - 3.3.3 外壳管 ..... 64
  - 3.3.4 气室的大小 ..... 65
  - 3.3.5 绝缘件 ..... 65
  - 3.3.6 滑动触头 ..... 66
  - 3.3.7 模块设计 ..... 66
  - 3.3.8 与架空线的连接 ..... 68
  - 3.3.9 弯曲半径 ..... 69
  - 3.3.10 导体和外壳的连接技术 ..... 69
  - 3.3.11 防腐蚀 ..... 74
  - 3.3.12 现场装配工作 ..... 76
  - 3.3.13 监测 ..... 76
- 3.4 质量控制和诊断工具 ..... 79
  - 3.4.1 零件的质量 ..... 80
  - 3.4.2 过程的质量 ..... 80
  - 3.4.3 局部放电检查 ..... 81
  - 3.4.4 现场高压试验 ..... 82
  - 3.4.5 质量控制结论 ..... 84
- 3.5 规划问题 ..... 84
  - 3.5.1 电网的影响 ..... 84

## VI 气体绝缘输电线路

3.5.2 可靠性 .....	92	4.3.3 与其他输电系统的比较 .....	155
3.5.3 接地 .....	93	4.3.4 冷却和通风 .....	156
3.5.4 安全 .....	94	4.4 运行方面 .....	156
3.5.5 环境限制 .....	94	4.4.1 概述 .....	156
3.5.6 相角补偿 .....	96	4.4.2 可用性 .....	157
3.5.7 载荷能力和过载能力 .....	96	4.5 老化 .....	159
3.6 规范检查表 .....	99	4.6 内部电弧故障 .....	159
3.7 敷设方式 .....	102	4.6.1 概述 .....	159
3.7.1 概述 .....	102	4.6.2 被动保护 .....	160
3.7.2 地上敷设 .....	103	4.6.3 电弧定位 .....	160
3.7.3 沟渠敷设 .....	106	4.7 维护 .....	160
3.7.4 隧道敷设 .....	107	4.8 维修 .....	161
3.7.5 直埋敷设 .....	110	4.9 人员安全 .....	161
3.7.6 定向钻孔 .....	120	4.10 绝缘配合 .....	161
3.8 长期试验 .....	121	4.10.1 概述 .....	161
3.8.1 概述 .....	121	4.10.2 典型 GIL 应用的过电压 .....	162
3.8.2 隧道敷设 .....	122	4.10.3 GIL 的绝缘配合 .....	166
3.8.3 直埋敷设 .....	130	4.10.4 规定的试验电压 .....	167
3.8.4 长期试验结果 .....	145	4.10.5 计算数据的校验 .....	169
3.9 气体处理 .....	146	4.11 系统控制 .....	170
3.9.1 概述 .....	146	4.11.1 引言 .....	170
3.9.2 混合气体处理 .....	146	4.11.2 气体密度监测 .....	170
3.9.3 结论 .....	147	4.11.3 局部放电监测 .....	170
3.10 调试和现场试验 .....	148	4.11.4 温度测量 .....	171
<b>第 4 章 系统和网络 .....</b>	<b>151</b>	4.11.5 GIL 监测总结 .....	171
4.1 概述 .....	151	<b>第 5 章 环境的影响 .....</b>	<b>173</b>
4.2 GIL 的线路参数 .....	151	5.1 概述 .....	173
4.2.1 理论基础 .....	151	5.2 视觉冲击 .....	173
4.2.2 电阻 .....	151	5.3 电磁场 .....	173
4.2.3 电容 .....	152	5.3.1 概述 .....	173
4.2.4 电感 .....	152	5.3.2 基本理论 .....	174
4.2.5 阻抗 .....	153	5.3.3 最大场强 .....	176
4.2.6 波阻抗 .....	153	5.3.4 计算 .....	177
4.2.7 自然功率 .....	153	5.3.5 外壳感应反向电流 .....	178
4.3 线路损耗 .....	154	5.3.6 GIL 的 EMF 测量 .....	179
4.3.1 概述 .....	154	5.3.7 直埋式 GIL .....	184
4.3.2 GIL 的损耗 .....	154	5.4 气体处理 .....	184

5.5	热影响	185	7.2.14	溪洛渡, 中国, 2011	211
5.6	回收	185	7.2.15	锦屏 I, 中国, 2011	212
5.7	全寿命周期评价	186	7.3	未来的应用	213
5.8	碳足迹	186	7.3.1	概述	213
<b>第 6 章 经济方面</b>			7.3.2	交通隧道	213
6.1	概述	190	7.3.3	道路及高速公路	215
6.2	材料成本	190	7.3.4	地上安装及野外安装	215
6.3	装配成本	192	7.4	案例分析	215
6.4	线路损耗	193	7.4.1	大都市区域	215
6.5	影响成本的因素	193	7.4.2	伦敦	216
<b>第 7 章 GIL 的应用</b>			7.4.3	柏林对角线	217
7.1	概述	196	7.4.4	山区	218
7.2	应用实例	197	7.4.5	海洋	218
7.2.1	施卢赫湖, 德国, 1975	197	7.4.6	GIL/架空线混合应用	219
7.2.2	温得和克, 纳米比亚, 1977	198	<b>第 8 章 输电系统的比较</b>		
7.2.3	约书亚瀑布, 美国, 1978	199	8.1	概述	220
7.2.4	鲍曼维尔, 加拿大, 1985-7	200	8.2	GIL 的特点	220
7.2.5	Shin - Meika 东海线, 日本	201	8.3	技术比较	221
7.2.6	PALEXPO, 日内瓦, 瑞士, 2001	204	8.3.1	概述	221
7.2.7	百特威尔逊电厂, 美国, 2001	205	8.3.2	损耗	221
7.2.8	柿莲, 泰国, 2002	206	8.3.3	磁场	223
7.2.9	PP9, 沙特阿拉伯, 2004	207	8.3.4	电压额定值	224
7.2.10	开罗北, 埃及, 2005	208	8.3.5	电流额定值	225
7.2.11	海姆霍, 米德兰, 英国, 2005	208	8.3.6	短路电流额定值	225
7.2.12	黄河拉西瓦, 中国, 2009	209	8.3.7	过电压	225
7.2.13	克尔斯特巴赫, 德国, 2010	210	8.3.8	温度限制	226
			8.4	现场的比较	226
			8.4.1	可接近性	226
			8.4.2	最大重量	226
			8.4.3	最大体积	227
			8.4.4	土壤的类型	227
			8.4.5	运输道路	227
			8.4.6	现场车间的尺寸	227
			8.5	软特性	228
			8.5.1	概述	228
			8.5.2	美学	228
			8.5.3	隐形	228



## VIII 气体绝缘输电线路

8.5.4 噪声 .....	229	9.5 下一代技术 .....	236
8.6 经济性 .....	229	9.6 海上环境 .....	237
<b>第9章 输电管道 .....</b>	<b>230</b>	<b>第10章 结论 .....</b>	<b>238</b>
9.1 可行性研究 .....	231	<b>参考文献 .....</b>	<b>240</b>
9.2 欧洲海上风电 .....	232		
9.3 海底隧道系统 .....	232		
9.4 海上和岸上 PTP™ 构造 .....	235		

# 第 1 章 前 言

本前言介绍了气体绝缘输电线路 (GIL) 会在未来输电系统中起到重要作用的原因以及本书在现在写成的原因。

## 1.1 电力供应的发展

当今的输电系统即将发生根本改变。温室效应将改变发电的结构, 可再生能源的使用会比目前有极大的增加, 近岸和海上风电、太阳能、光伏、生物、水力、地热以及潮汐、海浪、洋流等海洋发电都是用来发电的可再生能源。

这些可再生能源产生的电力可以作为大规模发电装置或作为分布式小型发电装置进入电力市场。大规模发电装置通常远离负荷中心, 因此需要通过电网来连接<sup>[1]</sup>。

管理这些新能源需要智能化的潮流控制系统, 也称为“智能电网”。基于电力市场交易价格的智能电力消费要求发电厂到消费者之间的电力输送。风能、太阳能、潮汐和海浪以及其他具有波动特点的可再生能源带来了潮流的波动, 也要求对潮流的控制和长距离输电。为了更有效地利用这些具有波动性质的可再生能源, 电能储存将起到更重要的作用, 在可再生能源富余时把电能储存起来而到可再生能源缺乏时使用, 这种平衡是可再生能源得到有效利用的基础。

储存电能的途径有几种, 其中最为普遍的就是在能源富余价格低时把水抽到高处的蓄水池而在价格高时用储存的水发电。目前这种抽水蓄能电站用于在每天用电高峰时发电数小时。大型抽水蓄能电站每天可以发电 1000MVA 数小时, 然后需要继续蓄水, 这样的蓄能装置通常坐落在人烟稀少地区因此也远离用电负荷中心。在欧洲, 这样的条件已经很少了, 阿尔卑斯山和比利牛斯山可利用的空间是很有限的, 而低海拔地区也不能提供所需的容量。远距离的蓄能装置也需要输电线路把电能和消费者联络起来。

把压缩空气储存在大型矿山或山洞里是另一种储存能源的方式, 在可再生能源富余时把空气压缩后储存在矿山或山洞里, 而在可再生能源缺乏时把压缩空气释放出来通过涡轮机来发电。目前美国和欧洲都在开展这方面的探索, 大家希望在靠近负荷又有矿山或山洞的地区找到一个成本相对较低的储能方式<sup>[223]</sup>。

还有一种大容量的储能方式是用富余的太阳能和风能通过电解制氢, 并在高压 (约 30MPa) 条件下储存在地下 4000 ~ 5000m 深的岩盐层洞穴里。目前这种技术正在用于储存天然气。这种储能方式可以在北海地区的冬季, 例如一月份的几个无风日中, 用储存的氢气通过燃气轮机来发电。

住房的加热或冷却或商用冷库是另外一种储存电能的方式。加热或冷却是根据可再生能源的可获得性来调节，当可再生能源富余时加热或冷却住房，然后住房按其时间常数来储存这些能量。这可以通过能源价格策略来实现，建筑的加热或冷却在能源消费平衡中起作用。

把可再生能源储存在电动汽车的电池中是另外一种储存电能的方式。电动汽车大部分时间是静止的（车辆的 80% ~ 90% 的寿命在静止中度过），电动汽车的电池分布得非常分散并且可以提供大量的电能。把电动汽车连接在电网中可以通过智能电网来控制其从电网中充电或向电网送电。电池可以在很短的周期内在充电和送电之间切换，因而可以在基于波动性质的可再生能源供电系统的稳定性上做重要贡献。

可再生能源的储存是可再生能源市场的一个关键特性，在阳光或风力富余时电力市场收取电能并储存起来而在市场上需要更多能源时高价卖出。

小型和大型的储能装置都是必需的，如上文介绍，典型的分布式小型储能装置就是电动汽车的电池。就时间来说，电动汽车可以提供数分钟或数小时的供电，但在可再生能源缺乏数日或数周情况下就需要大型储能装置。

未来的大型可再生发电设施将远离都市电力消费中心，海上风电场和沙漠太阳能发电都坐落在能源消费很少的地区。大城市只占地球很少的一部分，但是它们的密度和电力消耗却在增长。大型储能装置通常和用户距离很远<sup>[2,3]</sup>。

这样就需要长距离大容量输电来把发电和用电联系起来。为了平衡可再生能源需要大范围互联，例如从北海和波罗的海到法国和西班牙的大西洋海岸，或从美国的东北部到东南部在远距离条件下利用风力<sup>[4]</sup>。

现在的输电系统并未提供理想的长距离、大容量输电网络。地区间只有很弱的互联来处理当某一地区大型发电机组（如 1500MVA）停机而另一地区需要供电的紧急情况。

当前热电厂通常坐落在靠近用户的地区来给当地提供所需的电力。未来可再生能源发电就不同了，未来需要长距离大容量连续输电网络，也称为超级电网。超级电网把发电厂和负荷中心的用户以及储能装置（如抽水蓄能）联系起来。

由于其他原因，这种大容量、长距离输电线路在中国和印度已经或正在建设。这两个快速发展的国家都在利用大型水电装置来发电，例如中国的三峡和印度的特赫里，数千兆瓦的电力通过 1000 多公里的长距离输电送到上海和孟买等大城市。

中国和印度的先进高压输电技术表明长距离输电需要高可靠和高效的交流 1000kV 和直流  $\pm 800$ kV 特高压输电线路。中国从 2010 年投运了  $\pm 800$ kV 来实现大型发电站和大都市之间的连接。这些长距离输电线使用架空线方式，铁塔很高（通常 70 ~ 80m），导线束很大（8 分裂或 10 分裂导线，直径 500 ~ 800mm）。如此大型的架空线不是任何地方都能实现的，可能需要地下输电或至少在局部使用地下方式。对大容量输电的需求以及架空线和地下输电结合的可能性使得 GIL 成为整体

解决方案或至少是部分解决方案的良好选择<sup>[217]</sup>。

现在有很多大型陆上和海上风电场在规划或建设,大型光伏电站以及太阳能电站也在规划,试验性项目已被证实是可行的。在海上风电是最好的,在沙漠中太阳能是最优的,这些都需要长距离输电来补偿波动并把可再生能源带给消费者。

当架空线无法实现时,GIL 就提供了一个和架空线输送能力一样的(例如 400kV 输送 2000MVA)地下替代方案。

40 多年来第一代气体绝缘技术的应用经验是 GIL 用于地下输电系统的良好基础。气体绝缘技术在 19 世纪 60 年代开始用于变电站,目前以其高可靠性得到了非常广泛的应用。2001 年问世的用  $N_2/SF_6$  混合气体的第二代 GIL 以及降低成本的管道敷设方法使得 GIL 成为未来高可靠性和可用性的大容量、长距离地下输电系统<sup>[168]</sup>。

## 1.2 GIL 的优点

如下所列,GIL 用于大容量输电具有一些优点<sup>[9,10]</sup>。

**输电损耗低** 由于导体和外壳截面大,使得阻性损耗低。根据外径(500mm 或 600mm)以及外壳和导体的壁厚(6~15mm)典型的 GIL 电阻为 6~8m $\Omega$ /km。输电损耗和电流的平方相关  $P=I^2R$  ( $I$ =电流,  $R$ =电阻)。当 GIL 的额定电流高时(如 3000A),损耗低的特性就更显著。绝缘气体中的损耗可以忽略不计。

**电容负载低** GIL 的电容很小,一般为 55 $\mu$ F/km,因此只有在长度很长的情况下才需要相位角补偿。在传输距离 100km 左右的大多数网络情况下不需要或需要很少补偿线圈,这也降低了热损耗。

**传输容量和架空线相当** GIL 是架空线的理想替代或补充方案。GIL 的高输送容量(550kV 单回达 3000MVA)使其与架空线串联直接通过地下而不需要降低容量。GIL 也允许使用和架空线同样的控制保护方式。在 GIL 和架空线结合时不需要不同的保护方式来确定故障位置。GIL 的电容小,因此涌流也小。

**人身安全水平高** 由于外壳可靠接地因此不可能接近高压部件(气密外壳)。GIL 在承受短路电流(50kA、63kA 或 80kA, 1~3s)时的人身安全仍是可以保证的。试验证明即使发生内部电弧故障仍然不会对外部产生影响。

**可靠性高** GIL 的唯一目的是输电,因而不需要内部开断或关合能力。根据这些特点可以把 GIL 看成没有运动部件(如开关)的高压气体绝缘系统。目前世界范围内已有单相长度超过 300km 的 GIL 系统投入运行 35 年以上。至今尚未有主要故障(系统内电弧故障)的报道。这一点使得 GIL 成为已知最可靠的输电系统。

**无电老化** 气体绝缘是不老化的。最好的例子是用空气作绝缘气体的架空线。绝缘件的电场强度和 GIL 的最高温度都非常低以至于不能产生电老化或热老化,这已经通过独立实验室的长期测试以及系统中大量在用设备的经验得到证实。第一个 GIL 项目在 1974 年投入使用,CIGRE 国际大电网对运行结果作了报道<sup>[71,224]</sup>。

**和架空线同样运行** 架空线可以以自动重合闸方式运行，这就意味着当线路上检测到接地故障时，断路器会自动切除线路，过几秒钟后（取决于系统条件）再合上。多数情况下引发短路操作的条件会解除而使输电线恢复运行（例如，如果一段树枝距离输电线太近，这段树枝会被烧掉，如果故障电流由雷击引起，数秒后也会恢复）。

**电磁场** 为了保护公众以及操作人员，国际上对电磁场有限值要求，这些限值根据各地区和国家的法律和法规要求而不同。目前世界上的趋势是限值越来越小而限制更严。在人口稠密地区及城市，这些电磁场的要求规定了输电线的许用设计。

GIL 运行于可靠接地条件下因而感应回路是通过接地闭环的，耦合系数约为 95%，这意味着两个反向电流的重合减少了 95% 的外部电磁场，只有 5% 的导体电流产生 GIL 的外部电磁场。

根据感应定律，导体电流在外壳内会感应出同样大小但相位差  $180^\circ$  的电流。两个电磁场的叠加结果接近为零。在限制周围磁场情况下，可靠接地的 GIL 可以满足非常低的磁场要求。当额定电流 3000A 时，周围几米的磁场强度可以达到  $1\mu\text{T}$ （一些国家要求如此）。

在输电线靠近居民区时，低磁场的优点是非常重要的，特别是对于有很多灵敏设备的机场、医院以及拥有很多灵敏电子设备的个人和商家来说。

在意大利，新装设备的电磁场要求磁通低到  $0.2\mu\text{T}$ 。当涉及居住区时，GIL 可以在数米范围内达到这样的低值。

**无热老化** GIL 设计为可以在外部条件给定的最高工作温度下运行，在隧道中可接触温度为  $60^\circ\text{C}$  或  $70^\circ\text{C}$ ，直埋情况下为  $40^\circ\text{C}$  或  $50^\circ\text{C}$ ，不同的温度取决于不同的国家及其采用的标准和规定。

在所有情况下，导体  $100 \sim 120^\circ\text{C}$  的最高允许温度是远远达不到的，因此，在这些运行条件下系统不会发生实际的老化。

## 第 2 章 历 史

本章介绍了电力供应的历史以及气体绝缘输电线路的发展历程。

### 2.1 电网的发展

#### 2.1.1 总论

当电气化于 19 世纪中叶开始时，发电装置是靠近用户的。发电机用 100V 直流向用户——电灯或电机送电。发电机由河流的水轮机带动，用户是家庭、农场、办公室和小型工业（如锯木厂）。

当城市开始使用电灯作路灯、工厂开始使用电机来生产时，电气化就加快了，用河流水力或蒸汽机的发电站用直流输送电力。由于直流电流很难开断，点对点连接是非常普遍的。在电气化的早期阶段，常常就直流和交流的相对优点展开讨论，争论围绕两个主要观点：

- 特斯拉观点——赞成交流电，因为可以转换为其他电压等级并且容易开合；
- 爱迪生观点——赞成直流电，因为传输损耗低并且传输效率高。

今天我们知道，交流电在电网发展的第一阶段获胜了，主要原因是更高电压等级的变压器以及开关元件。当交流变换到数千伏特，开关和断路器执行了可靠的操作后，电力的应用就更广泛了。大型发电站通过有开关的电网用交流高电压给更多用户服务。

随着交流技术不断开发新材料，更高的电压等级开发出来并且得到应用；随着电灯和电机的可靠性和使用寿命的改进，越来越多的用电设备安装起来因而更多电力消费增加了。到了 19 世纪末电压水平升高达到数千伏特，这时纽约、伦敦、巴黎和柏林安装了第一批集中式使用蒸汽机驱动的交流发电机。

随着绝缘材料的技术发展、绝缘件的生产以及对高压电场的深入理解，更高的电压等级投入使用。随着断路器和开关的发展，点对点的输电系统也发展为高压输电和中压配电的电网。输电电压到了 100kV 的数量级，小的地方发电商也互相合作把各自的系统连接起来成为城市范围的发电商和配电商。他们就成为最早的配电公司然后成为公用事业。

随着公用事业的成长，发电规模也在增长，公用事业的联合使得电力供应在大范围内实现。电厂的装机也在不断加大，从 100MW 到 500MW，后来到了 1000MW，与这些大容量电厂相适应，输电电压也上升了，欧洲的典型电压是

220kV, 北美的典型电压是 242kV, 这些输电电压在 20 世纪 20 年代初开始使用。输电电压的后一步提升发生在 20 世纪 60 年代, 欧洲出现了 380kV, 而北美和日本使用 345kV/550kV。在随后的年代里 345kV 至 550kV 的输电电压在世界范围得到应用。最高的输电电压出现在北美、南美、南非和俄罗斯——达到 735kV、765kV 和 1000kV。今天, 特高压输电线路已经出现在中国 (1100kV) 和印度 (1200kV)。北美和欧洲也在规划用特高压输电来把长距离的可再生能源连接到负荷中心<sup>[12]</sup>。

### 2.1.2 输电级别

现在的电力系统可以划分为 5 个级别: 本地、区域、国家、国际、洲际, 见表 2.1<sup>[13,14]</sup>。

**本地级** 电力系统的本地级 (第一级) 和用户的距离最近, 通常为 1 ~ 5km, 本地级别代表了电力系统的起源, 也是 100V 直流开始运用的地方。随后的发展是从直流改成交流, 典型的接线方式是相对地, 在美国和日本用 100V, 而在欧洲和亚洲以及南美洲用 240V。现在我们使用三相交流 400V 系统, 这些电压等级使用相当普遍而且不会轻易改变, 因为替换所有的用电设备成本相当高。

**区域级** 区域级 (第二级) 通常覆盖一个地区, 典型的是城市及其周边地区。区域的典型范围是 100km 左右, 电压等级 100kV 以下并且有大型发电装置安装在区域内。区域内的发电商可以是私有的, 也可以是由城市或区域机构所有的公用事业。这些稍大的公司, 跟那些本地的发电商相比, 拥有更大的发电装置, 运行更高电压等级的输电和配电线路, 在更大的区域内为更多用户服务。在区域级别内有一些电压等级先后被使用: 1kV, 3kV, 4.5kV, 12kV, 15kV, 20kV, 33kV, 42kV, 52kV, 在世界上还可以看到更多在这些数值之间的电压等级。这些一步步提高的电压等级反映了绝缘材料的技术发展。现在的国际标准规定的配电电压为 1 ~ 52kV。

表 2.1 输电级别

级别	形式	举例	典型长度	典型电压级别	典型电流
1	本地	城市小发电商	1 ~ 5km	500V 以下	500A
2	区域	城市公用事业, 大都市如柏林、伦敦、纽约、巴黎, 区域如巴伐利亚	100km	1 ~ 52kV	2000A
3	国家	国家公用事业如法国、意大利, 大区如美国东北部	1000km	400kV* 和 550kV** 以下	4000A
4	国际/跨区	互联电网如 UCTE、NORDEL、MAGHREB、伊泰普、卡布拉巴萨	2000km	400kV* 500kV** 800kV**	5000A
5	洲际	洲际电网如欧非、欧亚	3000km	1100kV*** 1200kV****	6000A (预计)

\* 欧洲、中东、印度、非洲

\*\* 北美、南美、亚洲

\*\*\* 中国、日本

\*\*\*\* 印度



当区域输电和配电结构建立时会形成很多小的私有公司和公用事业公司，至今这些小公司仍在运行——为独立的城市和地区服务。这些区域供电商的范围典型为100km左右。现今的电力市场改革目标之一就是改变过去的垄断经营，改变所有制结构，在竞争机制中产生新的区域供电结构，目标是让电力使用者在法律和法规设定的条件下有权选择电力供应商。这将把新的参与者带入电力市场，更多的公司可以在市场中交易。在现在的输配电网设计时工程师们还没有考虑电力交易，这意味着电网的设计和使用会发生基本改变。

**国家级** 国家级（第三级）供电可以由国家（如法国）或国家的部分地区（如美国的加利福尼亚）的边界来识别。在某些国家电力供应被看成国家任务因而通过政府规定来设立公共或国有公司。在欧洲有一些这样的国家级供电公司，如法国的EDF和意大利的ENEL。在其他联邦制国家，电力事业的发展是通过私有企业实现的，这些私有公司从发电量和服务的用户数量来说都和公用事业大小相当。在欧洲可以发现这样的供电公司（如德国的RWE、PrueussenElectra、Bayernwerk）。在北美区域性公用事业可以达到欧洲一个国家的范围（如东北部的纽约爱迪生，西北部的Bonville电力联合公司[BPA]，东南部的田纳西谷当局[TVA]）。

国家供电级别的典型范围为500~1000km，相应的电压水平在欧洲、中东、非洲、南美以及亚洲的部分地区达到420kV，在北美、日本、南美的部分地区、亚洲和非洲达到550kV。

**国际级** 国际或跨区级（第四级）指的是数个国家或大区组成的区域。第四级电网用于大型输电网的稳定，从历史的角度来说第四级电网的发展意味着用高压线在区域之间实现连接以应对某国家或地区发电厂失电的紧急情况。当发电厂或输电线出现故障造成电能损失时，相邻区域的连接对电网起到支持作用并使其稳定。欧洲的输电合作联盟UCTE规定两个1500MW的核电站的电力需由国际或跨区3000MW的备用容量来匹配。在电网的任一点的电能集中都要限制在这个范围内。欧洲和北美的典型国际或跨区电网范围约为3000km。

在欧洲，北部的NORDEL、中部的UCTE和东部的波罗的海电网是同步连接的。在美国有许多独立系统运营商（ISO），这些独立系统运营商在相同频率下运行并以较低的容量互相连接。

**洲际级** 洲际级（第五级）目前还不存在，但是会随着可再生能源在世界范围的应用对长距离输电提出的需求而发展。这一级别需要更高电压来覆盖长达3000km的长距离洲际输电。长距离就需要用到输电损耗低的高压直流输电。作为未来洲际输电水平的一部分，已经有一些线路在世界各地投入运行了。洲际输电可能还要30多年以后才实现，但目前中国和印度的项目证明其在技术上和经济上都是可行的。

### 2.1.3 长距离输电

非洲的卡布拉巴萨工程建于1977~1979年间，用来连接赞比西河的水利资源和1420km以外的工业化的南非，这条输电线的传输能力为1920MW，输电电压为



DC  $\pm 533\text{kV}$  (见表 2.2)。

表 2.2 南非开发区卡布拉巴萨工程主要数据<sup>[8]</sup>

投运	1979, 于 2008 年更新
额定功率	1920MW
直流输电电压	$\pm 533\text{kV}$
架空线长度	1420km

图 2.1 是一个大型水坝, 图 2.2 是一个小型水坝。大型水坝通常坐落在偏远地区且需要通过高压交流或直流输电线与负荷中心相连。小型水坝通常与负荷中心很近因而用较低的高电压相连。

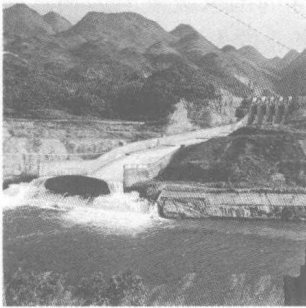


图 2.1 大型水坝举例  
(由 Siemens AG 授权提供)



图 2.2 小型水坝举例  
(由 Siemens AG 授权提供)

南美洲的伊泰普水电站把阿根廷/乌拉圭边界的水电传输到 800km 以外的巴西圣保罗地区, 伊泰普水电站于 1987 年投入运行, 两个直流系统把 6300MW 的电力输送到圣保罗及周边地区 (表 2.3 是伊泰普工程的技术参数, 图 2.3 是大坝里的 735kV 交流气体绝缘开关设备 [GIS])。

表 2.3 巴西/阿根廷伊泰普工程主要数据<sup>[16]</sup>

投运	1984 ~ 1987
额定功率	6300MW
直流输电电压	$\pm 600\text{kV}$
架空线长度	线路 1: 685km 线路 2: 805km

美国较早的工程之一是大西洋互联工程, 该工程从俄勒冈的水坝把 3100MW 的电力输送到洛杉矶都市地区, 输送距离为 1360km, 见表 2.4。

高压直流输电线从 1970 年开始建设, 1985 年、1989 年和 2004 年分几个阶段从额定功率 1440MW 升级到 1600MW、2000MW 和 3100MW, 直流电压升高到  $\pm 500\text{kV}$ 。



图 2.3 水电站的高压气体绝缘开关设备 (由 ABB Switzerland 授权提供)