

高压输电系统 的 中性点接地

R. 维尔罕姆 M. 华德斯著

吳維誠 毛鈞燾 王一字等译

中国工业出版社

統一書號: 9

15165·4328(水电-595)

定 价: 3.60 元

1
144

高压输电系统 的 中性点接地

R. 维尔罕姆 M. 华德斯著

吳維誠 毛鈞燾 王一字等譯

中国工业出版社

本书广泛阐述有关电力系统中性点接地方式的选择问题，以及绝缘运行的可靠性、过电压、继电保护等方面的问题，并详论系统发生接地时的暂态过程。有相当大的篇幅研讨中性点的谐振接地、消弧装置及辅助设备的结线和结构。最后介绍许多国家、地区所采用的不同接地方式。

本书可供从事高压输电系统设计和技术运行的技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

本书系由下列同志翻译：吴维诚译序，引言；第二章第13~16节，第三章；张大猷译第一章，第二章第11~12节；马廷禧译第二章第1~10节；要焕年译第四章；毛鈞燾译第五章，第六章第1~13节；王一字译第六章第14节，第七、八、九、十、十一章及附录。

R. Willheim, M. Waters
NEUTRAL GROUNDING IN HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION
ELSEVIER PUBLISHING COMPANY AMSTERDAM, 1956

高压输电系统的中性点接地

吴维诚 毛鈞燾 王一字 等译

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $31^{3/4}$ ·字数652,000

1966年4月北京第一版·1966年4月北京第一次印刷

印数0001—3500·定价(科五)3.80元

统一书号：15165·4328(水电-595)

序

对中性点接地的方式和同它有关的问题，目前的看法是有分歧的，表现为从教条式的信仰到冷静的分析，从心安理得到亟图改进。二十年来，一些不同意见的交流以及由若干作者和科研单位发表的使用性能报告所提供的大量事实，已产生一种健全的影响。过电压的危险性已从现场经验里找到数量上的大小概念。故障的统计分析也阐明了事故的原因、它们的发生频率以及和一次、二次的作用。在控制故障发生率和增进供电安全方面已有巨大的进步。

事实上，事故统计还表明一般运行结果还没有达到应有的和可以获得的运行水平。不过目前已可选用一些先进方法，这些方法如果合理使用，即使在困难的环境下，也应取得重大的改进。

散见于大量著述中的关于这项技术的较新贡献，有不少提供了以前由于仅作猜测而致隐晦的许多问题的现实分析方法。……^①

在这点上，作者感到应及时综合已经积累的大量资料，并对已有的和正在发展的技术进行评价。

正在演变中的情况的一个值得注意之点，是谐振接地所起的作用。……

……不可能在本书这样一个标题下对输电技术这一部分应有的完整说法作详尽说明，同样也不易在按题归类时始终保持明显的分界线。有些一般性的问题，其中如直接接地系统的接地继电保护的讨论，则散见在第二部分（谐振接地）中那些叙述能较为完整的处所。……

作者 1956年1月于伦敦

^① 原序中有关叙述学派传承、此书的前身德文本情况及志谢等节，因无关重要，均予删去。——译者

目 录

序

引言	1
----------	---

第一篇 接地故障和接地方式

第一章 高压电网内的充电电流	2
1. 高压输电线的电容效应	2
2. 几种基本导线排列方式的电容	3
3. 简单导线系统的电容图解. 定义	6
4. 平行架设的多导线系统 (直接电容, 泄漏电容)	11
5. 双芯和三芯电缆的电容	15
6. 接地故障的性质	16
参考资料	17
文献	17
第二章 正常和接地故障情况下的高压系统. 中性点接地的理论	17
1. 悬浮的中性点, 电气重心. 中性点位移	17
2. 关于电气重心的一般原理	19
3. 中性点不接地的三相系统中由于接地故障所承受的电压	23
4. 电容性接地故障电流的分布	25
5. 电流和电压的零序分量. 几个典型例子	31
6. 其他重要故障型式的等效电路	33
7. 输电线路的零序阻抗	35
8. 变压器的零序阻抗	41
8.1. 星形-星形结线的内铁型变压器	41
8.2. 星形-星形结线, 磁回路畅通的电力变压器. 单相变压器组	44
8.3. 三角形-星形结线的变压器	45
8.4. 曲折形结线的变压器	47
8.5. 用二次结线来短路零序分量	48
8.6. 斯高脱结线的变压器	49
9. 旋转电机的零序阻抗	49
9.1. 圆磁化	49
9.2. 单层绕组	50

9.3. 双层绕组	51
9.4. 轴磁通	51
9.5. 参数值	51
10. 接地故障时健全相的稳态电压	52
10.1. 中性点直接接地	52
10.2. 中性点经电抗接地	54
10.3. 中性点经电阻接地	56
10.4. 不接地和谐振接地的系统	57
10.4.1. 持续性接地故障, 其发生的频率和持续的时间	57
10.5. 电流和电压应力的互换性	59
10.6. 有效接地的系统	60
10.7. 数字例子	60
10.7.1. 低电抗接地	60
10.7.2. 低电阻接地	61
10.8. 过电压和故障电流的一般曲线	63
10.9. 发电机接地问题的说明	65
10.10. 接地故障所引起的动态过电压	69
10.10.1. 中性点不接地系统. 在接地故障和系统之间的集中电抗的效应	70
10.10.2. 不接地的中性点. 断线时的接地故障	74
10.10.3. 在不对称短路的发电机的开路轴上的过电压	82
11. 接地和不接地系统的暂态绝缘应力	82
11.1. 雷电冲击波	82
11.1.1. 直接雷击	82
11.1.2. 感应过电压	84
11.2. 故障时的暂态过程	85
11.2.1. 突然接地时的暂态过程	85
11.2.2. 弧光接地	86
11.3. 操作过电压	87
11.3.1. 励磁电流的开合	87
11.3.2. 切断无负荷线路	88
11.4. 现场经验. 结论	91
12. 输电线路和发电站设备的绝缘水平.	

接地方式的影响	94
12.1. 输电线路	95
12.2. 开关设备	97
12.3. 变压器	100
12.4. 交流发电机	102
12.5. 其他设备	103
13. 由接地故障引起的电力回路间电容相互作用	104
14. 电力回路对电信回路的干扰。接地方式的影响	105
14.1. 电容干扰	106
14.1.1. 大地环路和大地环路间的相互作用	106
14.1.2. 电力回路的大地环路和电信回路的金属环路间的相互作用	108
14.1.3. 两回路的金属环路间的电容相互作用	108
14.1.4. 电力回路的金属环路在静电方面对电信回路的大地环路的相互作用	109
14.1.5. 单线大地回归的电信回路	109
14.2. 电磁干扰	109
14.2.1. 大地环路和大地环路间的相互作用	110
14.2.2. 电力回路的大地环路和电信回路的金属环路间的相互作用	113
14.2.3. 电力回路的金属环路和电信回路的金属环路间的相互作用	114
14.2.4. 电力回路的金属环路和电信回路的大地环路间的相互作用	114
14.2.5. 单线大地回归的电信回路	114
14.3. 数例比较	115
15. 接地故障邻近的电压梯度	117
16. 接地方式的选择及其优缺点	119
16.1. 中性点有效接地的系统	119
16.1.1. 优点	119
16.1.2. 缺点和减轻缺点的方法	120
16.2. 中性点阻抗接地的系统	121
16.2.1. 电抗接地系统	121

16.2.2. 电阻接地系统	121
16.2.3. 阻抗接地系统的其他特点	123
第二章结语	123
参考资料	124
文献	128
第三章 三相系统内由接地故障引起的暂态现象	134
1. 接地故障的开始和发展	134
1.1. 介质强度的逐渐变化	134
1.2. 对地间隔的突然减低	135
1.3. 发电站设备的绝缘事故	135
1.4. 架空输电线	136
1.5. 从公布的接地故障统计中分析运行记录	141
1.6. 发生次数和正常工频波的关系	145
1.7. 电缆系统内的接地故障	147
2. 由正常状况过渡到接地状况的现象(接地暂态现象)	147
2.1. 发生绝缘事故后的进行波	147
2.2. 变压器和旋转电机对放电波的反应	149
2.3. 变压器(或发电机)和线路间的中频暂态现象	152
2.3.1. 不接地系统	152
2.3.2. 中性点直接接地的系统	157
3. 接地故障的遮断和恢复期暂态现象	159
4. 间歇性接地故障(弧光接地)	163
4.1. 重燃的机理	163
4.2. 振荡熄弧的机理	164
4.3. 彼得生理论的一些特点	166
4.4. 正常工频熄弧时弧光接地的机理	170
4.5. 中性点不接地系统内弧光接地的实验性观察	172
4.6. 用系统中性点接地来防止弧光接地	175
4.7. 中性点接地系统内弧光接地的实验性观察	177
5. 由接地故障暂态阶段引起的感应效应	178
5.1. 在进行波阶段的干扰现象	178
5.2. 由振荡暂态引起的干扰。对邻近系统的作用	180
5.3. 串联变压器上振荡暂态的感应作用	181

VI

參考資料..... 183

文獻..... 185

第四章 接地故障消除措施的发展和目

前趋势 187

1. 消除接地故障与遮断接地故障的对比

..... 187

2. 消弧接地开关 188

3. 管型避雷器(排气式保护间隙) 189

4. 故障线路的快速重合 191

5. 对相序分量具有辨别反应的串联电抗

..... 198

6. 接地故障补偿装置(消弧线圈) 199

參考資料..... 199

文獻..... 201

第二篇 諧振接地

第五章 接地故障补偿装置(消弧线圈)

一般理論 204

1. 有关历史和名詞的說明 204

2. 持续性接地故障时接地故障补偿装置的作用

..... 204

3. 有持续性接地故障的系统运行 209

4. 具有接地故障补偿装置的系统中的接地故障电弧的熄灭

..... 209

5. 具有接地故障补偿装置的系统发生故障后的暂态分量

..... 217

6. 功率损失对接地故障补偿装置运行的影响

..... 222

7. 残余故障电流的功率损失分量 223

8. 中性点接消弧线圈的电力变压器的选择

..... 226

9. 輔助接地变压器 232

10. 消弧线圈电流所经过的系统其余部分

..... 234

11. 接地故障补偿装置的不同形式 234

11.1. 三相接地故障补偿装置中磁路的双重作用

..... 235

11.2. 满意的三相諧振接地装置的主要特性

..... 236

11.3. 真实的三相接地故障补偿装置 236

11.4. 磁路互联式三相接地故障补偿装置

..... 237

11.5. 具有互联星形繞組的磁路互联形

式..... 238

11.6. 具有星形-三角形繞組的磁路互联

裝置. 鮑赫变压器..... 240

11.7. 三相接地故障补偿装置与中性点接

地电抗器的比較..... 242

12. 同时补偿接地故障电流和线路充电电流

的裝置..... 243

13. 諧振接地与非諧振接地的比較..... 244

參考資料..... 245

文獻..... 245

第六章 接地故障补偿装置(消弧线圈)

特殊問題 247

1. 残余故障电流及其补偿 247

1.1. 功率损失分量的补偿 247

1.2. 諧波分量的补偿 250

1.2.1. 残余故障电流中高次諧波的来源

..... 250

1.2.2. 残余故障电流中諧波的补偿..... 253

1.3. 不对称系统的残余故障电流 256

2. 諧振接地系统中故障阻抗的影响 257

3. 电抗系统中应用接地故障补偿装置 262

4. 諧振接地系统中的諧振現象 264

4.1. 諧振接地系统中电容不对称的效果

..... 265

4.1.1. 永久性不对称 265

4.1.2. 暂时性不对称 265

4.1.3. 諧振接地系统电容不对称的等效电路

..... 266

4.1.4. 暂时性不对称百分率的数值..... 267

4.1.5. 由电容不对称引起的中性点位移。损失的限制作用。琼納斯

的圖因 268

4.1.6. 电容不对称引起的中性点位移。磁飽和的限制作用

..... 273

4.2. 飽和电抗器作为相接地裝置和中性

点接地裝置的运行特性 276

4.3. 变压器繞組和电源电压不对称的效果

..... 279

4.3.1. 由短路匝造成的电压不对称..... 279

4.3.2. 带負荷調整分接头裝置所产生的电压不对称

..... 279

4.3.3. 相繞組断线 280

4.3.4. 由注入零序分量所引起的电压

不对称	281	10. 采用諧振接地方式的限度	319
4.4. 諧振接地系統中限制中性点 位 移 的 方法	282	11. 諧振接地系統中的过电压	321
4.4.1. 飽和磁路	282	11.1. 基頻过电压	321
4.4.2. 非諧振的調諧	282	11.2. 操作过电压	322
4.4.3. 增大功率損失分量	283	11.2.1. 断开励磁电流	322
4.4.4. 消除不对称的原因	284	11.2.2. 断开线路充电电流	323
5. 线路間电容耦合在电力系统間引起的相 互作用。电容耦合的补偿(橫补偿)	284	11.2.3. 諧振接地系統中斷开兩相对地 故障	325
5.1. 多导线线路由单个 等 效 导 线 来 代 表	285	11.2.4. 实际和模拟系統中观察到的操 作过电压	328
5.2. 三角形接法的去耦合线圈	289	11.3. 雷击过电压	328
5.3. 星形接法的去耦合线圈	290	11.3.1. 接地方式对雷击过电压的数值 和形状的影响	328
5.4. 去耦合变压器	295	11.3.2. 由雷击进行波在接地装置中引 起的絕緣应力	330
5.5. 阻尼电阻	297	11.3.3. 减少接地装置絕緣应力的方 法	333
5.6. 系統中性点的直接互相連接	298	11.3.4. 接地装置的冲击絕緣水平建議 值	334
5.7. 三角形接法去耦合线圈的圓图	298	11.3.5. 避雷器和接地故障补偿装置的 工作范围和任务	335
5.8. 星形接法去耦合线圈的圓图	301	11.3.6. 多相雷击閃絡对于諧振接地系 統运行特性的影响	336
5.9. 去耦合变压器中性点电压向量的軌 跡	303	12. 电暈对于消弧的影响	338
5.10. 有效接地系統与諧振接地系統的相 互作用	303	13. 諧振接地系統对不同形式系統扰动的反 应	342
6. 有金属連接的双回线路的 电 容 接 地 故 障 电流	304	13.1. 变压器不对称	342
7. 諧振接地系統对邻近通信线路的干扰	306	13.2. 同时发生短路和接地故障	342
7.1. 基頻干扰	306	13.3. 系統稳定	343
7.2. 音頻干扰	307	14. 接地故障的測定和消除	343
7.3. 直接接触的干扰	308	14.1. 接地故障的指示	344
8. 消弧和正常运行时对称运行 的 通 用 条 件	308	14.2. 瞬时性接地故障的高速指示	344
8.1. 具有 n 根导线的单独系統	308	14.3. 持续性接地故障	345
8.2. 两个系統。补偿和去 耦 合 的 通 用 理 論	310	14.3.1. 残余故障电流中有功分量的分 布	346
9. 特长线路的接地故障补偿	312	14.3.2. 瓦特計式接地故障继电器。設 計特点。時間分級	348
9.1. 特长线路的图解分析	312	14.3.3. 电压互感器, 結线 和 特 性 要 求	350
9.2. 对于諧振接地系統的应用	314	14.3.4. 电流互感器, 結线 和 特 性 要 求	352
9.2.1. 在线路一端的接 地 故 障 补 偿 装 置	315	14.3.5. 系統中固有的使接地故障继电 器不正确动作的因素	355
9.2.2. 在线路中間某点的接 地 故 障 补 偿装置	317		
9.2.3. 线路兩端的接 地 故 障 补 偿 装 置	317		
9.2.4. 功率損失的影响	318		

14.3.6. 人为地增加有功分量.....	357	1.11. 电容电流和泄漏电流的季节性变化.....	409
14.3.7. 电力变压器的接地故障保护.....	358	2. 接地故障补偿装置的定额、位置和布置.....	409
14.4. 非谐振接地系统的接地故障继电保护.....	358	2.1. 定额.....	409
14.4.1. 不接地和高阻抗接地系统.....	358	2.2. 位置.....	410
14.4.2. 有效接地和低阻抗接地系统.....	358	2.3. 布置.....	411
14.4.3. 母线保护.....	365	2.4. 辅助设备.....	412
14.4.4. 故障得到防止的系统中的次生效应.....	366	3. 接地故障补偿装置设计所需的资料.....	414
参考资料.....	366	参考资料.....	414
文献.....	368	文献.....	415
第七章 谐振接地系统行为的評價。在减少故障率上与其它方法的比較.....	376	第九章 接地故障补偿装置的设计、試驗及投入运行.....	417
1. 中性点利用谐振接地的系统在运行上的优点.....	376	1. 接地故障补偿装置的设计.....	417
2. 运行經驗.....	377	1.1. 一般设计原則.....	417
3. 与其它降低故障率方法的比較.....	382	1.2. 热的定额.....	419
3.1. 避雷线的遮蔽.....	382	1.3. 絕緣等級.....	420
3.2. 改善的接地.....	385	1.4. 分接头和辅助线卷的设计。等效框架尺寸.....	421
3.3. 提高絕緣水平.....	386	1.5. 线圈电流的连续調节.....	427
3.4. 管型和閘型避雷器.....	387	1.5.1. 采用由直流控制的电抗器.....	428
3.5. 快速重合.....	387	1.5.2. 杆式电抗器.....	428
3.6. 双回线路.....	387	1.5.3. 移动线圈式調节.....	430
3.7. 不间断供电。实际成就,改善运行所需的費用.....	389	1.6. 线卷布置.....	431
参考资料.....	389	1.7. 損耗; 鋼鉄損比率.....	433
文献.....	390	1.8. 三相式接地故障补偿装置.....	434
第八章 接地故障补偿设备的设计 and 布置.....	392	1.9. 实际设计举例.....	436
1. 接地故障电容电流的决定.....	392	2. 接地故障补偿装置的試驗.....	441
1.1. 三相单回线路.....	393	2.1. 中等容量的接地故障补偿装置.....	441
1.2. 三相双回线路.....	396	2.2. 大容量的定额.....	443
1.3. 精确的計算法.....	398	3. 接地故障补偿装置及其附属设备的投入运行.....	443
1.4. 近似法的应用于联立方程式組.....	399	3.1. 利用人工接地故障进行試驗.....	444
1.5. 系数的縮減。等值导綫.....	400	3.1.1. V 形曲线法.....	444
1.6. 架空线的图和表.....	403	3.1.2. 圓圈法.....	444
1.7. 絕緣子电容的校正及其它.....	407	3.1.3. 瓦特表法.....	447
1.8. 電纜的接地故障电容电流曲线.....	407	3.2. 利用自然的或人为的系统不平衡的試驗.....	447
1.9. 接地故障电容电流的快速估算.....	407	3.3. 投入前系統情况的检查.....	448
1.10. 直接測量.....	408	3.4. 接地故障继电器的投入.....	448
		参考资料.....	450
		文献.....	451
		第十章 谐振接地系統中調諧的監視和	

季节性变	自动控制	451	3. 英国	468
..... 409	1. 調諧的監視	452	4. 爱尔兰	469
置和布置	1.1. 間接(手动操作)監視	452	5. 非洲南部	470
..... 409	1.2. 直接監視	453	6. 澳大利亚	473
..... 409	1.2.1. 利用自然的系統不平衡	453	7. 新西兰	473
..... 410	1.2.2. 人为的不平衡	453	8. 加拿大	475
..... 411	1.2.3. 中性点注入	454	9. 馬来亚	476
..... 412	2. 自动調諧	458	10. 斯塔的那維亞	477
料	2.1. 补偿計继电器	458	11. 中欧和西歐	480
..... 414	2.2. 补偿計电动机	459	12. 苏联	482
..... 415	2.3. 对最大中性点位移的自动調諧	460	13. 日本	482
計、試	参考資料	461	14. 其他	482
..... 417	文獻	461	参考資料	483
..... 417	第十一章 諧振接地在各地的应用	462	文獻	485
..... 417	1. 德国	462	附录	489
..... 419	2. 美国	464		
..... 420				
效框架				
..... 421				
..... 427				
器				
..... 428				
..... 428				
..... 430				
..... 431				
..... 433				
..... 434				
..... 436				
..... 441				
..... 441				
..... 443				
投入				
..... 443				
..... 444				
..... 444				
..... 444				
..... 447				
衡的				
..... 447				
..... 448				
..... 448				
..... 450				
..... 451				
和				

引 言

本世紀的整个上半期內，在美洲和欧洲大電力系統的設计和运行实践方面，大多是沿着相似的方向发展的，这是由于自然界的內在規律到处都是一样。

不过有一个問題是按不同方向发展的，这就是对于由一些不能預料的自然現象（如雷电）所引起、或者是由于电气絕緣的偶然性所致的意外破坏而引起的電力系統停电的防止方法。

虽然这些現象还是由自然界的永恒規律所支配，但是它們的后果可能妨碍人定的規則；从一些負責电力和电信傳輸部門的法律方面來說，情况正是这样。因此，不同国家可能发展不同的做法，而在它們本身的範圍內都是很好的。

这样，在美国大電力系統的中性点大部分宁愿采用直接接地，并且在技术上連同所有分支部分（如各种事故开关操作）都得到了发展。另一方面，在欧洲发明了用諧振电抗器的电感接地，并已加以采用，它在接地一开始就使故障电流得到补偿，且不必采用新穎的开关操作程序，就能使电力和电信系統都得到保护。

所以現今有两种保护系統可用，各在其相应的範圍內很好地工作着，但在有些具体事物里仍有区别。

……現在有些欧洲大電力系統发展时采用了直接接地的技术，反之，美洲系統裝用諧振接地装置却在增多，二者各在其最有利的範圍內采用。……^①

R.魯登堡

麻省，劍橋。

① 引言中有关推荐本书作者等各节均已删节。——譯者

第一篇 接地故障和接地方式

第一章 高压电网内的充电电流

1. 高压输电线的电容效应

让我们来考虑一个接入电源并准备供电的高压网络。即使没有用户从这个网络里用电，但导线和它周围的介质却决不是不起作用的。导线由正极性和负极性电荷交变地充电，在导线之间，和导线对地一样，也建立了电压。虽然在后面我们将会看到，在多于两根导线时的实际关系要复杂得多，但研究我们的问题，可以由下式中的电荷与电位之间的线性关系出发：

$$Q = CV. \quad (1)$$

系数 C 表示导体排列的贮存电荷的能力，叫做电容，单位以法或厘米表示。这些单位在技术应用中的关系如下：

$$1 \text{ 法} = 10^6 \text{ 微法} = 9 \times 10^{11} \text{ 厘米}.$$

不同物体的比较，有助于获得一个关于电容数值大小的概念。大地可看作是一个球形电容器，其径向的电力线终止于无穷远处的一个异极性电荷；球的半径为6300公里 $= 6.3 \times 10^8$ 厘米，其电容值为700微法。在一个直流电压100伏电解液式电容器里，同样的电容可以放进约为160立方厘米的体积内，电容器的两极之间仅隔以一层很薄的介质。富兰克林的电容器，是一个用3毫米厚的玻璃制成的莱顿瓶，电容值为0.014微法。自然界所用的尺寸就比较大。面积为10平方公里、高度900米的雷云，与大地形成一个电容值为0.1微法的电容器；若以距地面高度10米，长度160公里的三相输电线路和它相比，那末线路的对地电容约为2.4微法。等式(1)说明，要在三条导线与大地之间建立11千伏的电压（瞬时值），所需电荷为：

$$11000 \times 2.4 \times 10^{-6} = 0.0266 \text{ 库伦}.$$

要在1/100秒内，把这个电荷变为数值相等极性相反的电荷，所需的充电电流平均值为：

$$\frac{2 \times 0.0266}{\frac{1}{100}} = 5.3 \text{ 安}.$$

系统愈大，电压愈高时，电容电流对电力线路的影响愈大。近代的超高压输电系统，长度达数百里，仅仅为提供导线相互间以及导线对地间的电场所需的无功功率的电流就要达数百安。

高压网络的这些特性，在电缆系统中就更加显著了。一条33千伏屏蔽型电缆（每条线芯都在单独的金属屏蔽层里），每相每公里相当于一个电容为0.25微法的电容器。电容的增大，是由于充电表面的相互接近和绝缘物的介质系数比较大。

在这种情况下，几百甚至几千千伏安的无功分量，将和有功功率一样，由系统来输送。在莱茵州的220千伏大系统中，接地故障要引起200,000千伏安的无功电容电力流动。这种电力的交换，就是再小一些也必须加以控制，以免在系统失去正常平衡状态时造成严重的后果。

高压系统电容不平衡的主要原因就是接地故障。为了寻找补救方法，必须从研究电容效应的性质着手。

2. 几种基本导线排列方式的电容

在以下关于导线电容性质的讨论中，把电荷看作是沿导线全长均匀地分布，由于电荷随时间的变化比起电磁波的固定传播速度来是太慢了，因此对它不会有什么影响。系统的各段，可假定它的作用都是接在电源母线上的集中电容。为了明确这样假定是允许的，只要记住80公里的长度在0.00027秒内即可布满充电电流，而这个时间不过是半个周期的一小分数。在特殊情况下，导线的电感特性需要仔细考虑，但这可留待下一章去讲。在目前的初步探讨中，导体的电感可忽略不计，这就意味着电荷的传播速度为无限大。

当介质常数等于1时，电荷 Q 与电场强度 E 的基本关系是

$$\int E_n dS = 4\pi Q, \quad (2)$$

式中 E_n 系垂直于表面的分量。

对于除了空气以外的介质，上式的左侧应乘以介质常数 ϵ 。若电力线沿表面 S 为均匀分布，则式(2)可简化为：

$$SE_n = 4\pi Q. \quad (2a)$$

上式的物理意义是： $Q = 1$ 的点电荷（静电单位），在半径为1厘米或面积为 4π 平方厘米的球体表面上，产生单位电场强度（系按cgs制静电单位数字方程方法，而不是按合理化电学单位表示）。

同轴异性电极位于无限远的圆筒导体的电力线图如图1所示。在介质的任意点：

$$E = \frac{4\pi Q}{S} = \frac{4\pi Q}{2\pi r} = 2 \frac{Q}{r}, \quad (3)$$

Q 和 S 分别为每单位长度圆筒导体的电荷和表面面积。

一单位试验电荷在半径为 r 和 R 两圆筒面间的电场作用下运动时，其所做的功 $W = \int E dr$ ，或其相当的电位降为

$$V_r - V_R = \int_r^R 2 \frac{Q}{r} dr = 2Q \log_e \frac{R}{r}. \quad (4)$$

每一等位面（ $V = \text{常数}$ ）均代表一能量水平，位于 P_1 与 P_2 两点的电荷，可以自由移动，只要它们都保持在它们原来的等位面上。电荷从 P_1 到达 P_2 ，与中间所经过的路径无关。

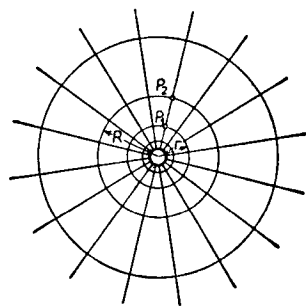


图1 圆筒形导体的静电场

散布于两圆筒等位面间的电力线,可以假定终止在等位面的表面上,只要所需的异极性电荷是在那里的话。在这两充电圆筒面之外没有电场存在。由式(1),可从电位差与电荷 Q 导出圆筒电容器单位长度的电容:

$$C = \frac{Q}{V_r - V_R} = \frac{1}{2 \log_e \frac{R}{r}}. \quad (5)$$

当 Q 与 V 以静电单位表示时,所求得的 C 为每单位长度多少厘米(厘米/厘米)。若换算为法,须乘以 $\frac{1}{9 \times 10^{11}}$ 。若电容用微法/公里表示,则应乘以 $\frac{10^6 \times 10^5}{9 \times 10^{11}} = \frac{1}{9}$ 。结果为:

$$C = \frac{1}{18 \log_e \frac{R}{r}} \text{微法/公里}, \quad (5a)$$

或

$$\frac{0.0894}{\log_e \frac{R}{r}} \text{微法/哩}$$

以 $\log_{10}$ 代替 $\log_e$ 得:

$$C = \frac{0.04826}{2 \log_{10} \frac{R}{r}} \text{微法/公里}, \quad (5b)$$

或

$$\frac{0.0777}{2 \log_{10} \frac{R}{r}} \text{微法/哩}.$$

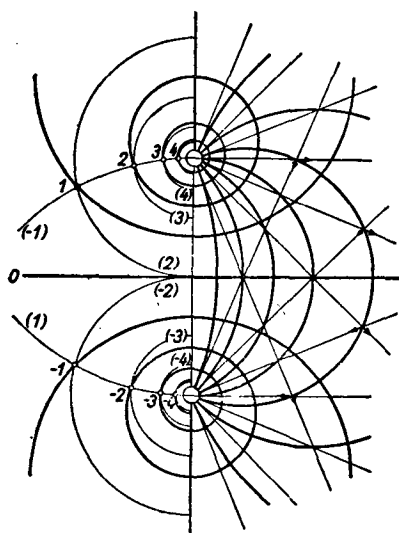


图 2 一对圆筒导体的静电场

除所谓屏蔽型电缆外,现代电力输送中实际上没有将导体作同心排列的。但是,同心导体的特性,是研究具有异极性电荷的平行导线的基础。所采用的适当步骤是将两圆筒形电容器的电场迭置在一起,其外层导体看成已移到很远的地方。此时,两导体趋于重合,在极限情况下,异极性电荷的效用将完全抵消。双圆筒的向量电场,如图2所示,系由原来的两个径向电场向量相加而成。可以看出,等位线和电力线同样也是一些圆。当移动一单

位电荷从一点 (r_1, r_2) 到另一点 (R_1, R_2) 时的能量变化是:电荷1的电场作用 $(V_{r_1} - V_{R_1})$ 和电荷2的电场作用 $-(V_{r_2} - V_{R_2})$ 。

以 V_r 和 V_R 分别表示两点的总电位能,则由(4)得:

$$V_r - V_R = 2Q \left(\log_e \frac{R_1}{r_1} - \log_e \frac{R_2}{r_2} \right), \quad (6)$$

异极性
与电荷

$$\text{或} \quad V_r - V_R = 2Q \left(\log_e \frac{r_2}{r_1} - \log_e \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (6a)$$

公式 (6a) 中 (r_1, r_2) 点的电位, 是相对于 (R_1, R_2) 点的电位而言。在离两导体无限远处选一基准点, 便可消去式 (6a) 中的第二项, 而变为

$$V = 2Q \log_e \frac{r_2}{r_1}. \quad (6b)$$

等位面是由图 2 中 $\frac{r_2}{r_1} = \text{常数}$ 的圆族平面所切成的圆柱体。从我们的要求来说, 这不须更

详细的证明。与等位面正交的电力线, 在导体表面之间形成另一组圆。用任一等位面代替导体表面, 并将电荷分布在它上面, 对结果并无妨碍。反之, 每个圆柱导体可用一根导线来代替, 虽然导线对几何轴还会有轻微的偏移, 而不能恰好互相重合。当直径对导体距离的比值甚小时, 偏心值可以不计, 兹证明如下。

在图 3 中, 任意从图 2 中选一等位面作为导体的表面。同时, 画出一条特殊的电力线, 在两圆心的连结线上形成一个半圆形。导体的几何轴位于对称面 E—E 上方高 h 处; 于是等效导线的轴 O 位于对称面以上另一距离 m 处。导体半径以 ρ 表之。圆形电力线在 S 点与导体表面成直角相交; 以 h 为斜边并以角 S 组成直角三角形, 可得:

$$m^2 = h^2 - \rho^2. \quad (7)$$

偏心值为

$$h - m = h - \sqrt{h^2 - \rho^2}.$$

当 $\frac{\rho}{h}$ 的值小时, 偏心值约等于 $\frac{\rho^2}{2h}$ 或导体半径 ρ 的 $\frac{\rho}{2h}$ 之一。因此, 在实际的输电线上偏心值是小于导线半径的百分之一。故在架空线的圆筒导体中, 其电磁的和几何的轴可看做是一致的。

更仔细地检查一下图 2, 发现电力线并不是均匀地从等位面引出, 这是因为两等位面间的宽度是不均匀的。在应用式 (2) 到导体表面的任何部分时, 应知电荷沿圆周的分布都是不均匀的。对于架空线路导线的一般尺寸和间距来说, 这仅是一个无关重要的细节。

从以下事实可以得出一个重要的结论: 即可以选取任何两个等位面作为带有极性相反、大小相等电荷的物体, 而不改变其静电场。特别是一个圆柱导体位于导电平面 E—E 的上方时, 也就是一导体位于大地之上时, 也包括在前面讨论的范围里, 因为在图 3 中对称平面 E—E 形成了一个等位面。位于平面之上的一个导体的电场, 完全等同于该导体与其极性相反、电荷相等的镜像导体之间的电场。这个等量关系, 将用来进行多导线布置的研究。

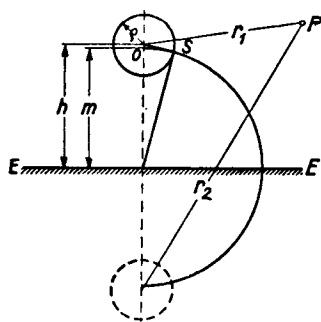


图 3 在导电平面上方的圆筒导体, 等效导线偏移值的确定

位于大地上方的一条导线的电位 V ，在任意点 P 都是由该点到导线本身的轴和到导线镜像的轴的距离 r_1 及 r_2 来确定 (图 3)：

$$V = 2Q \log_e \frac{r_2}{r_1}. \quad (6b)$$

对称面的电位为零。在导线表面的电位，按图 3 中的符号，可用下式表之：

$$V = 2Q \log_e \frac{2h}{\rho}. \quad (8)$$

单位长度的电容为：

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1}{2 \log_e \frac{2h}{\rho}}. \quad (9)$$

在确定数值时，应用前面和式 (5a)、(5b) 有关的说明，可得：

$$C = \frac{0.02413}{\log_{10} \frac{2h}{\rho}} \text{ 微法/公里}, \quad (9a)$$

或

$$\frac{0.03885}{\log_{10} \frac{2h}{\rho}} \text{ 微法/哩}$$

数字例子：一条直径为 0.63 厘米的单导线，离地面高度 10 米，每公里的电容为 0.0069 微法。

3. 简单导线系统的电容图解。定义

为了进一步分析导线和大地间的电容关系，让我们将一附加导线置于一主导线的电场内，令其轴与主导线平行，和地相隔离或与地连接，然后研究该附加导线的影响。

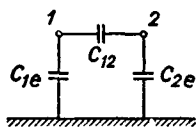


图 4 两导线间的基本电容关系

显然，任何一条半径很小的绝缘导线，可以只当它是测试该点电位的探测导线。该导线由于未与电源连接，故电荷为零。这两句话，初看象是不一致，因为无电荷而有电位似乎是自相矛盾的。但是如果我们假定两个不同极性的电荷同时存在于一个导体

上，一个电荷与主导体相连，另一个与大地相连，则解说上的困难就不存在了。这种情况，在两个串联的电容器中是很清楚的。这里很明显，绝缘起来的部分具有固定的电位，但无总的电荷。这种看法，可用图 4 的等值电容结线表示。导线 1 和 2 形成三个电容： C_{1e} 和 C_{2e} 是对地电容； C_{12} 是导线 1 与 2 之间的电容。它们都叫作“直接电容”。为了核对结线图的正确性，可以做出两种预先的判断，随后另加证明：

1. 若导线 2 保持绝缘，则导线 1 与大地间的电容不会发生任何改变，因为引入探测导线 2 不会引起电场结构的变化。对导线 2 可以完全不加考虑。这样，就使 C_{12} 与 C_{2e} 串联起来，并与 C_{1e} 并联，由式 (9) 便可直接求出导线 1 的电容 C_1 。