

中压电网系统接地

实用技术

ZhongYa DianWang
XiTong JieDi ShiYong JiShu

李润先 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

201222

TM77

L247

中压电网系统接地实用技术

李润先 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书作者根据 20 世纪 70 年代以来的国内外科技文献和科研成果, 结合其工作实践和多年学习研究的体会, 对中压电网系统的接地技术从理论和实践上作了较为系统的阐述, 并对谐振接地方式作了较全面的分析。

本书内容翔实, 图文并茂, 侧重实用性。对我国电力系统的发展及城网建设和改造、企业中压电网的建设和改造有实用参考价值, 可供从事电力设计、运行、安装、试验、检修、产品制造的广大科研、工程技术人员及有关管理人员阅读, 亦可供大专院校相关专业教师和高年级学生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中压电网系统接地实用技术/李润先编著. -北京: 中国电力出版社, 2001

ISBN 7-5083-0710-0

I. 中… II. 李… III. 中压电力系统—接地系统—技术 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 051159 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http://www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn))

北京梨园彩印厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 16.625 印张 366 千字

印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序 言



电力系统接地方式涉及电网的安全运行、供电可靠性、建设资金投入、用户安全等诸多重要问题。在专业技术方面涉及电力系统、过电压与绝缘配合、继电保护、通信与自控、电磁兼容、接地设计等诸多领域，因此，它是一个涉及技术经济方面、内容广泛的系统工程问题，也是国内外广大电气工作者多年来十分关注的课题之一。

进入 70 年代以来，为适应电力负荷迅速增长、电力网规模不断延深和扩展的需要，我国和欧洲一些国家对谐振接地方式进行了卓有成效的研究与实践，以微电子和微处理器为依托的自动跟踪补偿消弧系统已广泛成功地应用于国内外的中高压电网；中压电网电阻接地方式在美国等地已有多年的实践，近年来我国也在某些城网和企业中压电网中进行了若干探索与实践，与其配套的一、二次新产品也相继问世。但至今尚未见到对电网系统接地进行系统、全面论述的专著。编著本书的目的，就是想总结本人多年来在编制国家标准工作中的学习和研究成果，综合介绍国内外常用的属于系统接地范畴的基础理论和工程实用技术，阐述本人对中压电网不同接地方式的认识和理解，其中也包括对我国某些电气工程设计标准、产品制造标准的一些看法和建议，希望这些

内容能对我国中压电网系统接地的发展及城网、企业网的建设和改造有所裨益。

在电力系统中,单相接地故障占全部故障的60%以上,电力系统的安全可靠程度,在其他条件相同的情况下,只取决于电力系统中性点的工作方式。研究电力系统中性点接地方式的目的是,主要是要正确认识和处理这个最多见的单相接地故障问题。如前所述,在正确选择电网接地方式时,几乎要遇到输变电工程中的所有重要问题,因此,它需要一个熟练的工程师遵循电压、电流的互换原理,经全面地分析论证后,方能作出合理的选择。任何“一刀切”的作法是不可取的。

本书在总结国内外大量的专著、论文和本人的科研成果、学习体会的基础上,重点讨论了谐振接地方式的有关问题。主要内容包括:接地方式概论,中性点不接地系统,中性点谐振接地系统,中性点电阻接地系统,消弧线圈的跟踪补偿,单相接地故障保护装置,电力系统接地的选择与设计,接地设计的基本原理,现代防雷系统的设计,电力电缆故障的测距技术,电容电流的测量技术,以及系统接地与安全保护产品的主要技术参数(附录)等共12部分内容。

中国电力科学院熊正美教授和华北电力设计院前副总工程师盛和乐同志对本书给予了具体指导和帮助,在此谨向他们表示诚挚的谢意。中国电力出版社电力编辑室肖兰主任对本书的出版给以热情的支持和指导,在此亦表示衷心感谢。

由于水平和时间关系,疏漏错误在所难免,恳请广大读者批评指正,我会诚恳感谢,并作出改正。

李润先

2000年12月于北京

目 录



序言

第一章 接地方式概论

第一节	系统接地定义	1
第二节	影响选择接地方式的因素	2
第三节	中性点常用接地方式	9
第四节	常用接地方式的综合评价	11
第五节	过电压对中压电网的影响	20
第六节	危害人身安全的电压	23

第二章 中性点不接地系统

第一节	单相接地电流的稳态计算	31
第二节	单相接地电流的暂态计算	34
第三节	间歇电弧接地过电压	37
第四节	不对称短路引起的工频电压升高	47
第五节	耦合传递过电压	60
第六节	断线引起的潜振过电压	62
第七节	配电变压器绕组一点接地过电压	66
第八节	关于内部过电压的几个问题	70
第九节	过电压幅值的估算	71

第三章 中性点谐振接地系统

第一节	补偿电网的运行方式	75
第二节	补偿电网的中性点位移电压	92
第三节	单相接地时接地点电流	106
第四节	单电源线路中的断线过电压	108
第五节	在接地故障情况下切除消弧线圈时的过电压	110
第六节	全补偿的可行性和阻尼电阻的优化选择	113
第七节	关于电力电缆 U_0 电压的选择	117
第八节	采用自动调谐的必要性	120
第九节	谐振接地系统中过电压问题评价	121
第十节	关于电容电流限值的论证	126

第四章 中性点电阻接地系统

第一节	电阻接地的目的和分类	132
第二节	中性点电阻值的选择	134
第三节	单相接地故障时的稳态分析	136
第四节	转移过电压及其限制措施	139
第五节	校验中性点电阻值的必要条件	143
第六节	中性点经高阻抗接地方式	159
第七节	低压侧的绝缘配合问题	164

第五章 消弧线圈的跟踪补偿

第一节	调谐基础知识	171
第二节	消弧线圈的结构原理	173
第三节	自动调谐的基本原理	186
第四节	跟踪补偿原理的实现	200
第五节	对接地电流完全补偿的必要性	214

第六章 单相接地故障保护装置

第一节	概述	216
第二节	小电流接地系统单相接地保护原理	218
第三节	小电流接地系统单相接地选线装置	226
第四节	低电阻接地系统单相接地保护装置	239
第五节	低压电网的选择性漏电保护装置	253
第六节	接地故障点电阻对保护的影响	260

第七章 系统接地的选择和设计

第一节	系统中性点的取得和接地变压器	262
第二节	电力系统接地点的选择	270
第三节	中压谐振接地设备的选择计算	275
第四节	中压阻抗接地设备的选择计算	282
第五节	接地设备的技术参数	293
第六节	特殊问题	300

第八章 接地设计的基本原理与计算

第一节	概述	302
第二节	安全接地体的设计计算	304
第三节	安全接地网的设计计算	332
第四节	复合接地网接地电阻的简化计算	353
第五节	事故电压转移及其防护措施	356
第六节	“共地”问题的有关规定和实践	361
第七节	安全接地装置电阻的允许值与计算	369
第八节	地网接地导体截面的选择与计算	372
第九节	地网的腐蚀机理及其对策	379

第九章 现代防雷系统的设计

第一节	概述	389
-----	----	-----

第二节	防雷保护区的概念	390
第三节	现代防雷的技术措施	394
第四节	雷电流及其在各种设施中的分配	397
第五节	低压电源线路的分级保护	402
第六节	信息系统的分级防护	409

第十章 电力电缆故障的测距技术

第一节	概述	413
第二节	电缆故障传统的测距原理	414
第三节	电缆故障的精确定位技术	423
第四节	电缆故障的智能测距原理	427
第五节	电缆故障的在线测距技术	430
第六节	一种实用的故障距离的计算方法	432
第七节	电缆故障早期预报系统	435

第十一章 电容电流测定技术

第一节	概述	437
第二节	单相接地电容电流的直接测定法	438
第三节	单相接地电容电流的间接测定法	443
第四节	单相接地电容电流的工程算法	460
第五节	各种测定方法的评价	464

附录 中压电网系统接地与安全保护产品

一、概述	466
二、接地变压器的技术参数	467
三、跟踪补偿消弧线圈的技术参数	472
四、自动调谐消弧线圈成套装置的主要技术参数	475
五、智能型自动跟踪补偿消弧系统的主要技术参数	476
六、非自动调谐消弧线圈的主要技术参数	479

七、宽带补偿装置的主要技术参数	480
八、中性点电阻器的主要技术参数	480
九、零序电流互感器的主要技术参数	486
十、接地用继电器的主要技术参数	491
十一、避雷器与防雷器的主要技术参数	498
十二、电力电缆故障测距仪系列产品的主要技术参数	510
十三、WX-10H 型微机消谐仪的主要技术参数	511
十四、PQPT1000 系列电力质量分析仪的主要参数	511
参考文献	514



接地方式概论

第一节 系统接地定义

我国电力系统常用的系统接地方式有四种：中性点直接接地、中性点经消弧线圈（消弧电抗器）接地、中性点经电阻器接地、中性点不接地。其中，中性点经电阻器接地，按接地电流大小又分为高阻接地和低阻接地。

我国国家标准电工名词术语中，把上述四种接地方式归结为三类接地系统，即中性点有效接地系统、中性点非有效接地系统和谐振接地系统。中性点直接接地或经一低值阻抗接地的系统，称为有效接地系统；中性点不接地、经高值阻抗接地或谐振接地，称为中性点非有效接地系统；中性点经消弧线圈（消弧电抗器）接地，称为谐振接地系统。

1. 中性点有效接地系统

通常该系统的零序阻抗与正序阻抗的比值 $\left| \frac{X_0}{X} \right| \leq 3$ ；零序电阻与正序电阻的比值 $R_0/X_1 \leq 1$ 。该系统也称为大接地电流系统。中性点直接接地是有效接地系统之一。

2. 中性点非有效接地系统

通常该系统的零序电抗与正序电抗的比值 $X_0/X_1 > 3$ ，零序电阻与正序电抗的比值 $R_0/X_1 > 1$ 。该系统也称为小接地电流系统。

3. 谐振接地系统

该系统是中性点经消弧线圈（消弧电抗器）接地的系统，其零序阻抗与正序阻抗的比值趋于无穷大。

4. 电阻接地系统

该系统中至少有一根导线或一点（通常是变压器或发电机的中性线或中性点）经过电阻器接地。

在该系统中有高电阻接地和低电阻接地之别。

高电阻接地的系统设计应符合 $R_0 \leq X_{C0}$ 的准则，以限制由于电弧接地故障产生的瞬态过电压。一般采用接地故障电流小于 10A。 R_0 是系统等值零序电阻， X_{C0} 是系统每相的对地分布容抗。低电阻接地系统为获得快速选择性继电保护所需的足够电流，一般采用接地故障电流为 100~1000A。对于一般系统，限制瞬态过电压的准则是 $R_0/X_0 \geq 2$ 。其中 X_0 是系统等值零序感抗。

第二节 影响选择接地方式的因素

1. 供电可靠性

供电可靠性是对供电系统的主要要求之一。提高供电可靠性，通常采用提高网络中各元件和用电设备元件可靠性的途径。在其他条件相同时，供电可靠性只取决于电源中性点的工作方式。目前，我国中压电网的城市工矿企业的 6~66kV 送配电网中的中性点多采用不接地方式或消弧线圈接地方式。近十年来在城网和少数的工矿企业送配电网中

也采用了电阻接地系统。在采用非有效接地的城网或工矿企业送配电网络中，系统的一相与地之间的任何接触不大可能使负荷立即停电，这是一个无可争议的优点。这个优点的重要意义随着城网及工矿企业的类型不同而有所不同。美国电力科学院 H·G Hingozam 博士近年提出的“用户电力”(custom power)概念，越来越受到人们的关注。该概念表明用户的负荷类型不同，对供电连续性、可靠性要求也不同。近年来国内兴起的自动跟踪消弧系统接地方式，可以自清除 95% 以上架空线路和电缆线路接地故障，对发生在该系统中的瞬时故障，也能作记忆、追踪。这种接地方式在工矿企业和城网中发挥了很好的作用。在少数城网和企业中也采用了电阻接地系统，其继电保护的设计要求应是使其线路保护装置无论对何种故障都能将故障线路从系统中断开。对相对地故障，通常是将其故障线路立即跳开，接在线路上的负荷也随之断电。为了保证城网供电可靠性，通常应在中压环网中设有故障定位、隔离和自动恢复供电等综合技术措施，其高压主网通常采用“N-1”可靠性原则来规划设计，其低压网络中各项设备均应按接地方式要求作相应的选择。可见，对低电阻接地方式的中压网络设计，在一、二次设备要求方面比采用谐振接地方式所用设备要多一些，对自动化技术要求也要高一些。

综上所述，提高供电可靠性需要设计工作者通过精心设计，正确解决一、二次系统的协调配合来实现。

2. 安全因素

安全因素是选择中压电网接地方式时要重点考虑的因素。因为它涉及到人身安全、设备安全和企业安全等问题。

(1) 人身安全。

接地方式对人身安全影响的课题，在国内近年来刚刚提出，要得到确切结论，目前还为时过早。这里引用国际大电网会议上论文中提供的数据，表述如下。美国加州中压电网采用小电阻接地方式，瑞典中压电网大部分采用谐振接地方式，在人身安全方面的统计记录是，小电阻接地方式与谐振接地方式的死亡比率是 16:1；烧伤比率是 12:1，也就是说，小电阻接地方式的伤亡比率要比谐振接地方式高得多。究其原因，发现其与人的生理有关。我国规定人身安全电流极限值为 30mA。目前西欧、日本、前苏联等国家均采用 25mA。其科学依据是考虑了人的心脏对电流存在着敏感相位，该相位刚好与心电图 T 波段相对应，称为复极化期，其时间约为 0.2s。如果电流持续 0.2s 通过心脏，则心脏对电流最敏感，只要数十毫安电流，即可引起心室颤动，造成人员死亡。而任何保护装置及断路器的动作时间之和，往往大于此值，故希望通过速断时间减小的手段来实现人身安全问题，估计在大多数情况下难以实现。而把通过故障点的电流值降下来，才是实现人身安全的有效途径。1992 年 8 月，徐州矿务局权台煤矿电气维修工人王某，在 6kV 高压开关柜内检修时，开关柜误送 6kV 电压，王某的头部、背部、胳膊等多处对地放电，经诊断为皮肤烧伤。现身体不仅没留下残疾，而且成为该矿以完整的身躯和健康的身体重返工作岗位的第一例。事后分析认为，正是因为该矿采用了自动跟踪补偿消弧系统，使得通过人身电流很小、电弧能量很少，才出现了上述奇迹。

(2) 设备安全。

中性点接地方式与置于网络中的各类电气设备安全与否密切相关。对中性点不接地系统，其系统的相相间短路是通

过相关导体的对地电容形成通路，其总电流值等于非故障线路导体对地电容电流的总和；对谐振接地系统，其中性点通过消弧线圈（消弧电抗器）接地，其感抗值与输电线路的对地电容的容抗值相等或差值甚小，线路对地间的分布电容电流由消弧线圈产生的电感电流来补偿，从而使电弧很小或熄灭。偶然的接地故障是不可避免的。是否引起电气设备故障或火灾，直接与通过接地点的故障电流大小有关。开滦矿务局某矿从 60 年代以来，单相接地电容电流达 18A 左右，井下高压电缆曾多次发生火灾事故，且在一次接地故障中，接地电流把高压电机铁芯烧出拳头大的洞。而如果在电网中投入消弧线圈，这种接地故障机率就会明显降低。例如鸡西矿务局某矿，在投入消弧线圈前后对比，单相接地引起相间短路故障线路率减少 87.5%~90.5%，多重越野故障线路数减少了 73.3%~84%。中性点电阻接地方式是通过中性点电阻器，把接地电流限制在能使断路器可靠动作的范围之内。其故障电流大小取决于中性点电阻器和故障点处的阻抗值大小。最大接地电流只在靠近电源变压器处短路时发生。在特定条件下，这种接地方式会对网络中的电气产品带来较大损害。

(3) 企业安全。

工业企业的安全生产与其供电系统的供电可靠性密切相关。各类企业产品生产的工艺过程对供电的连续性要求不尽相同。在某些企业中，瞬间断电将会给它们的产品生产带来巨大的损失。例如，化工企业的乙烯裂变装置对供电连续性要求非常严格，数秒甚至一秒钟断电，将会使装置中的石脑油原料报废，而且要处理这一瞬间停电事故和恢复供电所需时间也要数小时。一次瞬间断电将会给企业造成数十万元甚

至上百万元浪费。煤矿矿井对供电连续性要求也比较高，电源的瞬间中断，虽然不会给企业带来重大经济损失，但是，恢复供电所需的时间较长。因为在恢复供电之前，要从采煤第一线的生产工作面开始，逐段、逐区地检查沼气含量，这是煤矿企业生产的特殊性所决定的。因此，在选择网络接地方式时，要充分考虑企业特点。

3. 不正常电压危害

在非有效接地系统中可能出现的过电压要比有效接地系统的过电压值稍高些，但是，采用自动调谐的系统，其过电压值也不高。对中性点不接地系统，当一相发生接地故障，会在同一网络中的三相系统中不接地相的绝缘上承受正常电压的 1.73 倍电压，这种电压或其他持续过电压或暂时过电压不会立即损坏绝缘，但是会影响绝缘寿命。而有效接地系统中出现的过电压值比较低，不大可能损害设备或绝缘。因此，在设计规划网络接地系统时，要密切关注不同接地方式所产生的过电压的机率。前苏联 1986 年研究报告结论为，6~35kV 谐振接地系统中因弧光接地产生的过电压，每年出现 3.2p.u. 的机率为 0.014%。我国清华大学研究报告的结论是，采用高频熄弧方式，调整电弧间隙的放电电压至 1.8~2.0p.u.，把弧光接地过电压幅值控制在 3.4p.u. 左右，这相当于实测过电压机率在 1% 以内。高阻接地系统中出现的过电压值与谐振接地系统相当，因此，该电压值对电气设备的损害程度与谐振接地系统大致相同。

4. 过电压因素

这一因素是选择系统接地方式时的重要因素。国内外科研成果的一致结论是，谐振接地系统的弧光接地过电压，配电变压器高压绕组接地过电压、铁磁谐振过电压等，由于在

电网中性点上接有消弧线圈，尤其是在近年广泛使用了具有自动跟踪补偿功能的消弧系统之后，上述三种过电压都可得到有效的抑制，甚至被完全消除。而断线谐振过电压与消弧线圈运行状态有关，在过补偿和全补偿状态下，其值不会产生对设备的损害。有效接地系统中的各类过电压值较低，这是该接地方式具有的优点。

5. 高电位转移

具有谐振接地或电阻接地的发电厂、变电站，通常都存在着高压系统接地故障产生的高电位向低压侧转移的危险。近年来，国际国内对这一课题都作了不少研究。国际电工委员会标准和我国国家标准中，都对此有专门的规定，这是规划选择接地方式时一定要考虑的因素。然而，这种高电位转移的危险目前还未被人们广泛认识。

6. 继电保护的选择性和灵敏度

通常有效接地系统中继电保护的灵敏度和选择性较好，而非有效接地系统中的接地保护，从前是一个难点，甚至一时成为不愿采用谐振接地方式的理由。然而，随着近代微电子技术和单片机技术的发展进步，适用于非有效接地系统的接地选线保护装置已日臻完善，它已成为谐振接地系统和不接地系统不可缺少的有力支柱。在谐振接地系统中，分散式单片机选线保护有取代集中式单片机选线保护的趋势；有效接地系统的接地保护装置也有了基于单片机原理的高灵敏保护装置。然而，保护装置的价格因素，是选择接地方式时不可忽略的因素。

7. 电缆的投资费用

根据国际国内电缆标准规定和运行实践，谐振接地和电阻接地都可以采用Ⅰ类电缆。因此在这方面，电阻接地方式