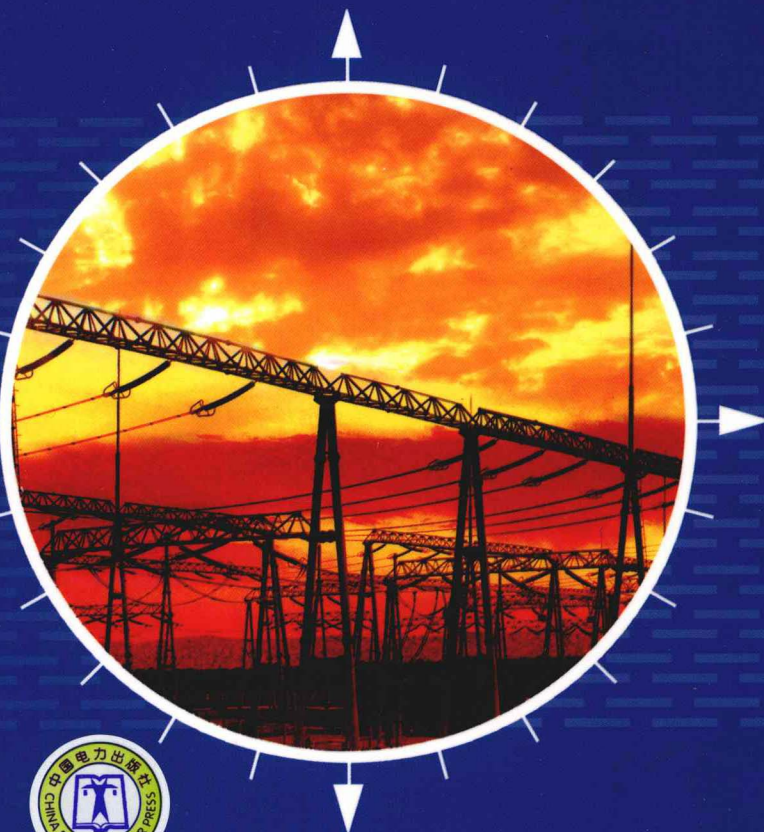


发电厂 变电站 过电压保护及接地设计

FADIANCHANG BIANDIANZHAN
GUODIANYABAOHU JI JIEDI SHEJI

舒廉甫 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

发电厂 变电站 过电压保护及接地设计

FADIANCHANG BIANDIANZHAN
GUODIANYABAOHU JI JIEDI SHEJI

舒廉甫 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书的主要内容包括:电力系统电压,电力系统中性点接地方式,发电机电压系统中性点接地方式;暂时过电压及其限制,操作过电压及其保护,快速暂态过电压;雷电过电压,雷电保护装置,架空线路雷电过电压保护;发电厂、变电站雷电过电压保护,旋转电机雷电过电压保护,中性点雷电过电压保护,近区供电雷电过电压保护,微波通信站雷电过电压保护;绝缘配合原则,架空线路绝缘配合,发电厂和变电站绝缘配合;接地设计步骤,接地设计一般规定;接地电阻要求;降低接地电阻的措施;工频接地电阻计算;冲击接地电阻计算;均压网设计,接触、跨步电位差允许值规定,接触、跨步电位差计算,接地装置电位计算,工频暂态电压及转移电位隔离;GIS接地,离相式大电流封闭母线接地,电缆线路金属层接地,移动式及携带式电力设备接地,微波通信站接地,计算机监控系统接地;接地系统、接地体、接地线及连接,接地导体截面选择及计算,接地体防腐要求及接地标志;接地电阻测量,接触、跨步电位差测量,土壤(水)电阻率测量;10个附录:雷电过电压计算的一些参数和方法,雷击线路杆塔时耐雷水平的计算,外绝缘放电电压的气象条件校正,发电机、变压器、架空线、电缆的电感、电容计算,各种波通道的波阻抗,发电机、变压器及其他电器设备的入口电容,避雷器主要技术特性参数,雷击水电站厂房对主要电气设备反击电压和变压器侵入波试验数据,全国年平均雷暴日数分布图,典型土壤(水)电阻率。

本书供发电厂、变电站从事过电压保护及接地设计、安装、运行、检修人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂、变电站过电压保护及接地设计/舒廉甫编著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-7483-3

I. 发… II. 舒… III. ①发电厂—过电压保护②变电所—站过电压保护③发电厂—接地系统—系统设计④变电所—接地系统—系统设计 IV. TM6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 016769 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 6 月第一版 2009 年 6 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12 印张 207 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

随着我国电力系统不断的发展和进步,完善的过电压保护方案、合理的绝缘配合和可靠的电气装置接地,不仅对发电厂、变电站安全、经济、可靠的运行以及人身安全至关重要,同时也影响到电力系统安全、可靠、稳定的运行。

发电厂、变电站过电压保护及接地设计牵涉面广,本书根据我国国情和工程建设、运行经验以及现行的过电压保护和接地规程(导则),并结合具体工程的科学研究成果和现场试验研究以及编著者40多年的工作经验,较为全面的和系统的偏重于设计应用而编写的。并关注以下几方面的内容:

- (1) 如何正确理解规程(导则)的条文,在设计上掌握的尺度和具体实施。
- (2) 系统中性点接地方式与系统的绝缘水平和过电压保护方式有着密切的关系,这里较为全面介绍中性点非直接接地方式和500kV系统中性点接地方式。
- (3) GIS设备的应用,出现了快速暂态过电压(VFTO),结合三峡工程的实例,概要的介绍了快速暂态过电压。
- (4) 通过几个水电站的雷击厂房顶对主要电气设备反击现场试验和变压器高压侧进波现场试验,提出电气设备反击机理和变压器可靠的保护方式。
- (5) 明确发电厂、变电站接地设计的步骤和低压线路供电方式。
- (6) 着重介绍工频接地设计理念和冲击接地设计理念的不同之处。
- (7) 与武汉大学电气工程学院合作进行了接地方面的科学研究:对均匀土壤率地区,大面积钢材、铜材接地网工频接地电阻的修正曲线和非均匀土壤电阻率地区,工频接地电阻的计算曲线。
- (8) 通过十几个发电厂、变电站工频接地电阻测量的实践,提出了工频接地电阻测量应注意的事项。

工频接地电阻计算中采用了武汉大学文习山教授主持的研究成果,表示衷心的感谢,同时致谢武汉大学解广润教授、陈维贤教授和中国电力科学研究院许颖教授及高级工程师,阅读他们所撰写的书籍和文章对编写该书受益匪浅。

编著者

2009年4月

目 录

前言

第一篇 过电压保护及绝缘配合

第一章 电力系统电压和中性点接地方式	1
第一节 电力系统电压	1
第二节 电力系统中性点接地方式	2
第三节 发电机电压系统中性点接地方式	12
第二章 暂时过电压、操作过电压	20
第一节 暂时过电压及其限制	20
第二节 操作过电压及其保护	33
第三节 快速暂态过电压	39
第三章 雷电过电压保护	50
第一节 雷电过电压	50
第二节 雷电保护装置	53
第三节 架空线路雷电过电压保护	64
第四节 发电厂、变电站雷电过电压保护	67
第五节 旋转电机雷电过电压保护	75
第六节 中性点雷电过电压保护	81
第七节 近区供电雷电过电压保护	82
第八节 微波通信站雷电过电压保护	84
第四章 绝缘配合	86
第一节 绝缘配合原则	86
第二节 架空线路绝缘配合	87
第三节 发电厂和变电站绝缘配合	88

第二篇 接 地

第五章 接地设计一般规定	94
第一节 术语定义	94
第二节 接地设计步骤	96

第三节 接地设计一般规定	97
第六章 接地电阻	102
第一节 接地电阻要求	102
第二节 降低接地电阻的措施	105
第三节 工频接地电阻计算	107
第四节 冲击接地电阻计算	115
第七章 均压及转移电位隔离	123
第一节 均压网设计	123
第二节 接触、跨步电位差允许值规定	125
第三节 接触、跨步电位差计算	126
第四节 接地装置电位计算	129
第五节 工频暂态电压及转移电位隔离	131
第八章 设备特殊接地	134
第一节 GIS 接地	134
第二节 离相式大电流封闭母线接地	135
第三节 电缆线路金属层接地	136
第四节 移动式及携带式电力设备接地	137
第五节 微波通信站接地	138
第六节 计算机监控系统接地	139
第九章 接地装置	141
第一节 接地系统、接地体、接地线及连接	141
第二节 接地导体截面选择及计算	143
第三节 接地体防腐要求及接地标志	147
第十章 接地装置工频参数测量	148
第一节 接地电阻测量	148
第二节 接触、跨步电位差测量	152
第三节 土壤（水）电阻率测量	153
附录 A 雷电过电压计算的一些参数和方法	156
附录 B 雷击线路杆塔时耐雷水平的计算	160
附录 C 外绝缘放电电压的气象条件校正	162
附录 D 发电机、变压器、架空线、电缆的电感、电容计算	164
附录 E 各种波通道的波阻抗	167

附录 F 发电机、变压器及其他电器设备的入口电容	169
附录 G 避雷器主要技术特性参数	171
附录 H 雷击水电站厂房对主要电气设备反击电压和变压器 侵入波试验数据	175
附录 I 全国年平均雷暴日数分布图	179
附录 J 典型土壤（水）电阻率	180
参考文献	182
后记	183

第一篇

过电压保护及绝缘配合



第一章

电力系统电压和中性点接地方式

第一节 电力系统电压

一、电力系统运行电压

标称系统电压和系统最高电压见表 1-1。

表 1-1	标称系统电压和系统最高电压										kV
标称系统电压 (有效值) U_n	3	6	10	(20)	35	66	110	220	330	500	750
系统最高电压 (有效值)	3.6	7.2	12	(24)	40.5	72.5	126	252	362	550	800

电力系统任何时间和任何点上的正常运行电压不得超过系统最高电压。

二、发电机电压系统运行电压

发电机额定电压和运行电压见表 1-2。

表 1-2	发电机额定电压和运行电压										kV
发电机额定电压 U_N	3.15	6.3	10.5	13.8	15.75	18	20	22	24	26	
发电机运行电压有效值	$(1 \pm 5\%) U_N = (0.95 \sim 1.05) U_N$										

注 1000MW 及以上的火电、核电发电机组额定电压为 27kV。

三、电力系统所承受的各种电压

运行中出现于电力设备绝缘上的各种电压有：

- (1) 正常运行时的工频电压；
- (2) 暂时过电压 (工频过电压、谐振过电压)；
- (3) 操作过电压；



(4) 雷电过电压。

一般电力系统电气设备承受的各种电压见表 1-3。

表 1-3

电力系统电气设备承受的各种电压

正常运行时的工频电压			
电力系统内部过电压	暂时过电压	工频过电压	空载长线电容效应
			发电机突然失去负荷
			电网单相接地故障
		谐振过电压	线性谐振：消弧线圈补偿电网、变压器电容传递、高压并联电抗器非全相运行
			参数谐振：自励磁、自参数谐振、水轮发电机非对称短路
			铁磁谐振：电磁式电压互感器、非全相运行的空载或轻载变压器
	操作过电压	空载线路分、合（重合）闸过电压	
		补偿电容器分闸过电压	
		空载变压器、高压并联电抗器分闸过电压	
		高压电动机分闸过电压	
		中性点不接地系统间歇性电弧接地过电压	
		电力系统不对称分闸或振荡的解列过电压	
		快速暂态过电压（VFTO）	
雷电过电压	直击雷过电压		
	感应雷过电压		
	侵入雷电波过电压		

◎ 第二节 电力系统中性点接地方式

一、电力系统中性点接地方式的实践

1. 电力系统中性点接地方式

电力系统不同的发展阶段，可以采用不同的接地方式。电力系统中性点接地方式如何，将影响到电力系统的过电压水平、电力设备的绝缘强度、系统的稳定措施、继电保护装置的保护方式、断路器开断容量、通信线路干扰、中性点过电压保护方式、中性点绝缘水平等。因此，电力系统中性点的接地方式，应根据诸方面的影响因素，进行综合的技术经济分析和比较后加以确定。

由于低压系统供电范围很小,受雷害的影响也较小,变压器中性点是采用全部直接接地,它能及时地切除故障点。但对于高压送电系统采用低压接地方式,其雷害跳闸率较高,同时影响供电范围。故对 3kV 以上送电系统采用变压器中性点不接地运行方式,虽绝缘水平相对较高,但也是可以接受的。随着电力系统增大和送电电压增高,单相电容电流不断增大,导致不接地系统弧光接地过电压事故,这样就影响了不接地系统的发展。自 1916 年德国彼得逊发明了消弧线圈后,不接地系统得到充分的发展,以致发展到 154kV 和 220kV 不接地系统。由于不接地系统增大后,接地电流中的有功分量增大,电弧常常不能自熄,使不接地系统的发展受到了限制。德国于 1960 年前将 220kV 不接地系统转为直接接地系统,瑞典在 1950 年秋就将 25% 的 220kV 变电站转为直接接地,芬兰于 1954 年,奥地利于 1957 年分别将 220kV 系统转为直接接地,日本也是如此。

我国 154kV 不接地系统的绝缘水平比 220kV 有效接地系统的绝缘水平低两级,用于设备绝缘的投资只低 15%,而输送容量却减半。为简化电压等级,我国已于 1965 年将 154kV 不接地系统改造为 220kV 有效接地系统。

目前我国 66kV 及以下高压系统,变压器中性点采用非直接接地方式,变压器中性点与端部绝缘一样,为全绝缘。对 110kV 和 220kV 高压系统,变压器中性点采用部分接地运行方式,变压器中性点绝缘水平为半绝缘(除自耦变压器中性点),即端部绝缘之半。

大多数欧洲国家配电系统采用多路电源供电,中压系统中性点也采用直接接地方式。电气设备绝缘水平按接地系统绝缘水平选取。在向国外采购中压电气设备时,一定要明确电气设备的绝缘水平。我国目前也有中性点经电阻接地的系统,也可按接地系统选取绝缘水平。

2. 中性点部分接地的电力系统存在的问题及解决措施

从我国 110kV 和 220kV 升压变压器中性点采用部分接地的运行经验来看,系统可采用简单可靠的零序电流继电保护,系统中变压器中性点接地的数目和分布,应根据系统运行方式和零序电流继电保护要求,以及避免频繁改变继电保护整定值来加以确定。因此,变压器中性点可以接地,也可以不接地,这种接地方式称为有效接地系统。

由于系统中有不接地的变压器,运行中中性点将产生各种过电压,致使变压器中性点设备及系统中设备受到损坏,成为我国 20 世纪 70 年代较为突出的问题。由于断路器在操作中不同期切合,将会产生谐振过电压和失步过电压;由于

变压器的工频传递过电压（变压器低压侧有绝缘监视的电压互感器），将产生铁磁谐振过电压；由于易形成孤立的不接地系统，将会产生弧光接地过电压等。为防止断路器切合不同期所产生的过电压及工频传递过电压引起低压侧铁磁谐振，原水电部生产司作出规定，在正常操作断路器时，将不接地的变压器中性点临时性接地，操作完后，再恢复不接地。但不能解决故障时，断路器非全相动作所引起的过电压。

为防止运行中不接地变压器中性点设备损坏，将变压器中性点采用棒间隙保护或棒间隙与避雷器联合保护，这使变压器中性点的保护复杂化。采用这种联合保护，损坏系统中设备的可能性仍然存在。

二、非直接接地系统

1. 中性点不接地

为避免间歇性电弧接地过电压，3~66kV 系统架空线路单相接地故障电流不大于 10A 或 3~10kV 电缆线路单相接地故障电流不大于 30A 时，35、66kV 电缆线路单相接地故障电流不大于 10A 时，系统中性点采用不接地方式。

2. 中性点经消弧线圈接地

3~66kV 系统架空线路单相接地故障电流大于 10A 或 3~10kV 电缆线路单相接地故障电流大于 30A 或 35、66kV 电缆线路单相接地故障电流大于 10A 时，为防止间歇性电弧接地过电压，需限制单相接地故障电流，系统中性点采用经消弧线圈接地的方式。消弧线圈可接在接地变压器中性点或厂（站）用变压器的中性点上。

中性点经消弧线圈接地的要求：

（1）发电厂、变电站的主变压器中性点经消弧线圈接地的系统，在正常运行情况下，中性点长时间的电压位移不应超过额定相电压的 15%。

（2）装有经消弧线圈接地的系统，故障点的残余电流不宜超过不接地系统的规定值。必要时可将电网分区运行，以减小故障点的残余电流。

（3）消弧线圈应采用过补偿运行方式。如消弧线圈容量不足，允许短时间以欠补偿方式运行，但脱谐度不宜超过 10%。

（4）消弧线圈的容量应根据电力网 5 年左右的发展规划确定，并按式（1-1）计算

$$W = 1.35 I_C \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (1-1)$$

式中 W ——消弧线圈的容量，kVA；

I_C ——接地电容电流, A;

U_n ——系统标称电压, kV。

目前有消弧线圈自动跟踪补偿接地装置, 在采用该种装置时, 一定要了解装置能否正确测量线路的对地电容值, 以保证消弧线圈能正确的跟踪补偿。

3. 中性点经电阻接地

我国中性点经电阻接地的系统, 都是为了切除有故障线路, 仍属于非直接接地系统, 只是暂时过电压持续时间较短, 绝缘水平可以按接地系统选取。无间隙金属氧化物避雷器的额定电压也按有效接地系统选择。中性点经电阻接地的方式有高电阻接地和低电阻接地两种。

(1) 中性点经高电阻接地。对 1s 或 2s 以内选择切除故障线路的非直接接地系统, 可采用高电阻接地 (如采用中性点经消弧线圈接地, 只要满足继电保护能在规定时间内选择切除有故障的线路), 高电阻接入接地变压器中性点, 其值可按式 (1-2) 计算

$$R = 1/(3K\omega C) \quad (1-2)$$

式中 R ——高电阻值, Ω ;

ω ——电源角频率, rad/s , $\omega = 2\pi f$;

C ——线路相对地电容值, F;

K ——容抗与电阻的比值, 一般 $K \geq 1$ 。

对于最大电容电流在 3~5 年内没有变化的系统, 取 $K=1 \sim 1.1$; 对于最大电容电流在 3~5 年内有增加的系统, 电容电流增加不超过 30%~40%时, 取 $K=1.5$; 远景发展可到时更换高电阻值或在原电阻旁并联一个电阻。不管如何选择高电阻值, 都要满足继电保护灵敏度的要求。

中性点经高电阻接地时, 接地变压器容量与高电阻容量一样, 可按式 (1-3) 计算

$$S = U^2/3R \quad (1-3)$$

式中 S ——接地变压器或接地电阻的容量, kVA;

U ——接地变压器额定电压, kV。

(2) 中性点经低电阻接地。对电缆供电的系统, 由于电容电流很大, 采用消弧线圈接地困难时, 可采用低电阻接地。低电阻接地系统应装设能自动切除接地故障的继电保护装置。低电阻值选择, 以控制流入变压器中性点的电流值 I_R , 对 10kV 系统 $I_R < 1\text{kA}$; 对 20kV 系统 $I_R < 2\text{kA}$ 。在满足继电保护灵敏度的前提下, 尽量增大低电阻值, 以减小电阻的热容量。



低电阻值可按式 (1-4) 计算

$$R = \frac{U_m}{\sqrt{3}I_R} \quad (1-4)$$

式中 R ——低电阻值, Ω ;

U_m ——系统最大运行电压, V;

I_R ——流入低电阻电流, A。

低电阻值的容量 S 可按式 (1-5) 计算

$$S \approx I_R^2 R \quad (1-5)$$

低电阻接地系统的单相接地故障点电流按式 (1-6) 计算

$$I_1 = \sqrt{I_C^2 + I_R^2} \quad (1-6)$$

式中 I_1 ——单相接地故障点电流, A;

I_C ——线路单相接地电容电流 A, $I_C = \sqrt{3}\omega CU$;

I_R ——中性点电阻电流 A, $I_R = U/\sqrt{3}R$;

U ——线路线电压, V;

R ——中性点低电阻值, Ω 。

(3) 接地变压器。非直接接地系统在无法获得中性点时, 可采用接地变压器。接地变压器铁芯为三柱式, 一般无二次绕组。一次绕组采用三相 Z 形接线, 每柱有相等两部分绕组组成, 两绕组绕制方向相反, 绕组与其他柱的绕组交叉连接, 图 1-1 所示为 Z 形三相接地变压器示意图。

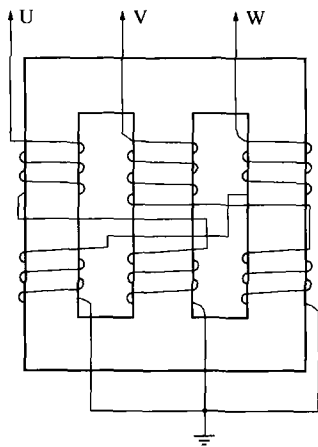


图 1-1 Z 形三相接地
变压器示意图

接地变压器每柱由两相绕组合成励磁, 三相合成励磁电流仍为对称分量, 接地变压器的正序阻抗很大。在正常运行时, 绕组只通过很小的励磁电流。接地变压器每柱两绕组的绕制方向相反, 零序阻抗很小。在接地故障时, 绕组允许流过较大的接地故障电流。

接地变压器的热稳定可按 10s 考虑选择其容量, 一般长期工作容量为计算容量的 1/10.5。当接地变压器兼作站用变压器时, 可设置二次绕组, 其容量可分别计算, 最后按较大的长期工作容量确定接地变压器容量。

三、有效接地系统

110~750kV 系统中性点采用有效接地方式,

系统任一处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 。

110~220kV 变压器 (除自耦变压器直接接地外) 中性点采用经隔离开关接地或经低值电抗接地。经隔离开关接地时, 根据系统运行需要变压器中性点可以接地, 也可以不接地。

330~750kV 变压器中性点应采用直接接地或经低值电抗接地。

1. 发电机升压变压器中性点经低值电抗接地

采用低值电抗接地源于 20 世纪 70 年代中期, 我国确定 500kV 电压等级后, 500kV 变压器中性点是采用全部接地方式, 还是沿用 220kV 变压器中性点部分接地方式, 双方观点争论十分激烈。若采用全部直接接地, 由于运行变压器台数变化要经常改变继电保护的整定值, 当时我国微机保护还不成熟, 采用压板式改变电流整定值是极为麻烦和有风险的; 发生单相故障时线路零序电流较大, 对通信线路干扰也较大, 当时我国还没有光纤通信线路。若采用变压器中性点部分接地方式, 一般 500kV 电气主接线采用 3/2 接线, 如在不接地的变压器串中, 线路发生单相接地故障, 3/2 接线中间断路器拒动, 那么就形成孤立不接地系统, 并带单相接地故障, 将产生很高的间歇性电弧接地过电压而损坏所有设备。为寻找一种双方都能接受的接地方式, 20 世纪 80 年代初在葛洲坝电站设计时, 选择了 500kV 升压变压器中性点采用低值电抗接地方式^①。

(1) 变压器中性点经低值电抗接地接线如图 1-2 所示。低值电抗取变压器零序电抗值的 1/3, 即变压器通过两倍变压器零序电抗值接地。当两台变压器都经 1/3 变压器零序电抗值接地时, 与一台变压器接地和一台变压器不接地的零序电抗值是相同的。经低值电抗接地的变压器退出一台运行时, 可将另一台运行的变压器中性点电抗器用隔离开关短接, 以维持零序电抗值不变。对于多台变压器也仿照此方法处理。这与部分变压器中性点接地方式基本相同, 但变压器中性点的各种过电压比部分变压器中性点接地方式的不接地变压器中性点要低, 见表 1-4。由于中性点过电压较低, 降低了变压器中性点的绝缘水平, 并提高了系统运行的可靠性。由于变压器中性点经低值电抗接地, 很难发生双电源频

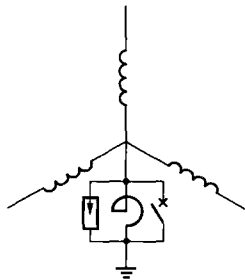


图 1-2 中性点经低值电抗接地

① 舒廉甫, 500kV 变压器中性点接地方式, 电力技术, 1989, 3: 36.

差过电压。

表 1-4 变压器中性点过电压

过电压名称		部分接地不接地 变压器中性点	经低值电抗接地 变压器中性点	要求及后果	
雷电过电压		$\frac{\pi \gamma U_L}{3}$	$\frac{\pi \gamma' U_L}{3 + \left(\frac{X_{T0}}{X}\right)}$	中性点上出现的过电压，波头已达 45~70μs 以上，近似操作过电压，要设置保护	
单相接地 工频过电压	暂态电压	$\frac{(1+2\alpha)\gamma U_{ph}}{3}$	$\frac{(1+2\alpha)\gamma' U_{ph}}{3 + \left(\frac{X_{T0}}{X}\right)}$	中性点避雷器在此电压下不应动作，这是选择避雷器额定电压的依据	
	稳态电压	$\frac{K_x U_{ph}}{K_x + 2}$	$\frac{0.5 K_x U_{ph}}{K_x + 2}$		
工频传递过电压		$\frac{C_{12} U_{ph}}{C_{12} + C_2}$	$\frac{C_{12} I_H X}{C_{12} + C_2}$	传递过电压较高时，会发生变压器低压侧电压互感器铁磁谐振	
断路器 非全相 运行过 电压	单端电 源工频 过电压	谐振	有	无	谐振将损坏电气设备
		稳态 电压	单相合闸 U_{ph}	$I_H X$	不接地中性点的电压高，选择避雷器的持续运行电压也高
	双电源频差 过电压		$2U_{ph} \sin \frac{\delta}{2}$	$\frac{2U_{ph} \sin \frac{\delta}{2}}{4 + \left(\frac{X_{X0}}{X}\right)}$	不接地中性点电压达 $2U_{ph}$ ，避雷器将会爆炸
形成孤立不接地系统 产生弧光接地过电压		有	无		将产生 2.8p. u. 弧光接地过电压，将损坏所有电气设备

注 n 为雷电波侵入变压器相数； U_L 为雷电波侵入高压绕组幅值，可取耐受值； X_{T0} 为变压器零序电抗值； X 为变压器中性点小电抗值，取 $X = X_{T0}/3$ ； γ 为振荡系数，一般 $\gamma = 1.6$ （纠结式绕组）， $\gamma = 1.8$ （连接式绕组）， $\gamma' = 1.2 \sim 1.4$ ； α 为线路电容系数， $\alpha = C_x / (C_x + C_0)$ ，一般 $\alpha = 0.18 \sim 0.2$ ； C_x 为线路相间电容； C_0 为线路对地电容； U_{ph} 为系统最大运行相电压； C_{12} 为变压器高低压绕组间电容； $K_x = X_0/X_1$ ， X_0 为系统零序电抗， X_1 为系统正序电抗，一般 $K_x \leq 3$ ； C_2 为变压器低压绕组对地电容； I_H 为变压器负载电流； δ 为两电源失步相位，表中两式的失步角度大小是不一样的； X_{X0} 为从变压器高压套管向系统看的零序电抗值。

20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期投运的水电站，如葛洲坝大江电站、隔河岩水电站、盐滩水电站等，500kV 主变压器中性点采用了低值电抗接地方式。90 年代末期我国的微机保护已成熟，光纤通信和微波通信增多，对金属导线通信线路进行改造或远离输电线路。为此，只要单相短路电流不超过断路器的开断容量，500kV 变压器中性点可采用全部直接接地，如彭水水电站、水布垭水电

站、构皮滩水电站等。

当单相短路电流超过断路器的开断容量时，变压器中性点可采用低值电抗接地方式，如三峡左岸水电站。三峡左岸水电站主变压器中性点若采用全部直接接地，单相短路电流达到 73kA，变压器中性点采用 5.6%（20Ω）的低值电抗接地，单相短路电流限制到 63kA，满足断路器的开断容量要求。

(2) 采用变压器中性点经 1/3 变压器零序电抗接地，在单相接地时，变压器中性点零序电压可按式（1-7）计算

$$U_0 = \frac{0.5K_x U_{ph}}{K_x + 2} \quad (1-7)$$

式中 U_0 ——变压器中性点零序电压，kV；

U_{ph} ——系统最大工作相电压，kV；

K_x ——零序电抗（ X_0 ）与正序电抗（ X_1 ）的比值， $K_x = X_0/X_1 \leq 3$ ， $U_0 \leq 0.3U_{ph}$ 。

(3) 220~750kV 变压器中性点最大零序电压、中性点绝缘水平和中性点保护避雷器见表 1-5。

表 1-5 变压器中性点最大零序电压、中性点绝缘水平和中性点保护避雷器 kV

标称系统电压	变压器中性点最大零序电压	中性点绝缘水平		中性点避雷器型号
		工频试验电压	冲击试验电压	
220	44	85	185	Y _{1.5} W54/140
330	63	95	250	Y _{1.5} W72/185
500	95.4	140	325	Y _{1.5} W102/260
750	138.6	200	480	Y _{1.5} W150/380

如果是为了限制单相短路电流，这就意味着 $K_x = X_0/X_1 < 1$ ，接入低值电抗后， $K_x = X_0/X_1 \approx 1$ ，变压器中性点的零序电压就很低， $U_0 < 0.18 U_{ph}$ 。

(4) 中性点电抗器的技术要求：

1) 中性点电抗器在流过零序电流范围内应为恒值，即要求电抗器伏安特性为线性，户外一般采用油浸式无铁芯电抗器，户内采用干式无铁芯电抗器。

2) 电抗器的热稳定，在电网发生单相接地时，流经变压器中性点小电抗中的电流除周期性分量外，还有非周期性分量。根据达氏公式中给出了周期性分量的等效时间系数，当热稳定计算时间在 0.5s 以上时，可不计非周期性分量的影响。小电抗器的热稳定电流取单相接地时，流过小电抗器的最大短路电



流周期性分量。热稳定时间不得小于升压变压器的热稳定时间，一般不小于 2s。

3) 电抗器的动稳定电流应考虑单相短路时的非周期性分量，以短路电流第一个波峰值来校验电抗器的动稳定，即 $I = 2.55 (3I_0) = 7.56I_0$ ， I_0 为变压器的零序电流。

4) 流过变压器中性点小电抗器的长期工作电流为三相不平衡电流，是非常小的，只有数安培。在确定电抗器额定工作电流时，可参照 IEEE-C62.92.3 标准，按不同时间热稳定电流是长期工作电流的倍数 K ，图 1-3 热稳定曲线沿长到 2s，那么 2s 热稳定电流是长期工作电流的 22.5 倍，则电抗器长期工作电流为 $I_n \geq 3I_0 / 22.5 \approx 0.135I_0$ 。

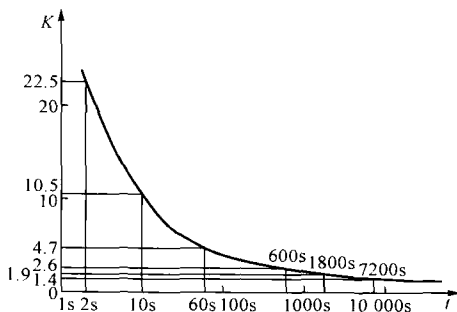


图 1-3 热稳定曲线

5) 电抗器的绝缘水平为变压器中性点的绝缘水平。电抗器接地端的绝缘水平可取 20kV 级，即工频 1min 试验电压为 55kV，基准冲击试验电压为 125kV。

6) 电抗器的温升要求，在连续电流下，线圈温升 70°C ，油温升 65°C 。热稳定电流下，线圈温升 90°C ，油温升 75°C 。

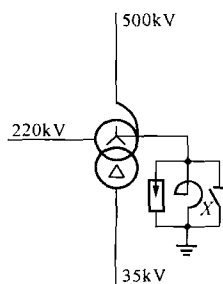


图 1-4 自耦变压器中性点
经低值电抗接地的接线

2. 500kV 自耦变压器中性点经低值电抗接地

自耦变压器中性点经低值电抗接地源于 2000 年后，其目的是为了限制 220kV 单相短路电流。中性点经低值电抗接地后，在零序等值回路上，增加了中压侧分支的电抗值，从而限制了中压侧单相短路电流。

(1) 自耦变压器中性点经低值电抗接地的接线见图 1-4。系统和变压器的正序和零序电抗等值回路见图 1-5。