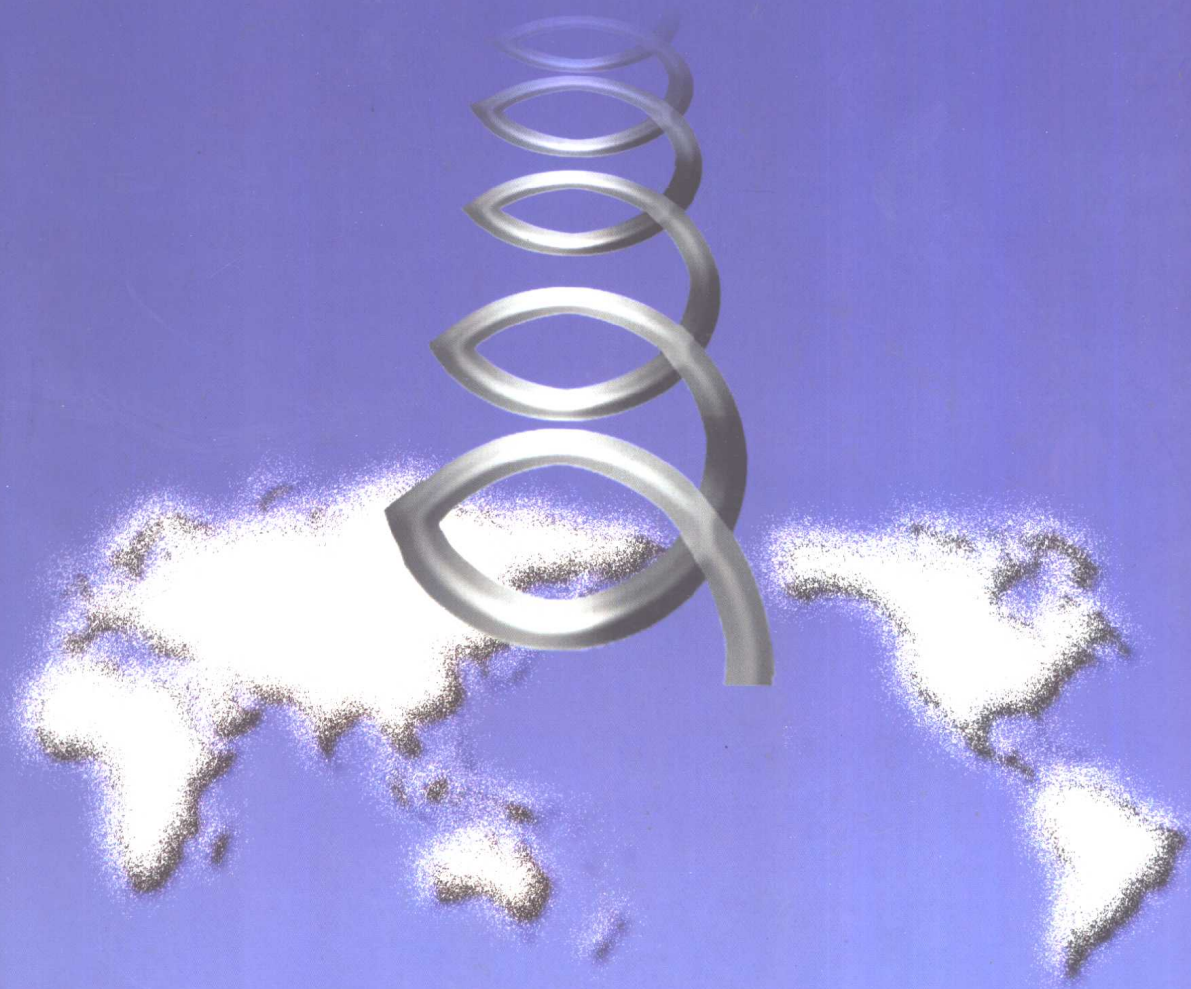


电力系统谐振接地

要焕年 曹梅月 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

电力系统谐振接地

要焕年 曹梅月 著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

根据科学发展与技术进步的观点,本书理论联系实际,在总结国内外电力系统运行经验的基础上,结合作者多年来的研究成果,对电力系统中性点的不同接地方式进行了概要的讨论,重点对其中的谐振接地方式问题进行了系统的分析与论述。

本书对电力系统的发展和城乡电网的建设改造具有实用与参考价值,可供电力系统中从事设计、运行、安装、检修、试验、制造的科研、工程技术人员及有关管理人员阅读,亦可供大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统谐振接地/要焕年 曹梅月著. -北京:中国电力出版社, 2000.8

ISBN 7-5083-0341-5

I. 电… II. 要… III. IV.

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1998) 第 0000 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>)

水利电力出版社印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000年7月第一版 2001年3月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.25印张 435千字

印数7001—10000册 定价32.00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



电力系统的中性点接地方式是一个系统工程问题，它涉及的专业范围较广，是电力系统安全、经济运行的重要技术基础。

我国1966年4月翻译出版的《高压输电系统的中性点接地》(Neutral Grounding in High-Voltage Transmission)一书，对以前的科研成果和实践经验进行了较全面的总结，并在序言中指出：“对中性点接地方式和与它有关的问题，目前的看法尚有分歧，表现为从教条式的信仰到冷静的分析，从心安理得得到亟图改进”。“过电压的危险性已从现场经验中找到了数值大小的概念”。“散见于大量的著述中关于这项技术的较新贡献，是对以前不少仅作为猜测而致隐晦的许多问题，提供了现实的分析方法”。“正在演变的情况中，一个值得注意之点是谐振接地所起的作用”。这些在数十年前已经宣示的观点，现在仔细回味依然颇具参考价值。近些年来，我国和一些国家对谐振接地方式又进行了卓有成效的探索和研究，并取得了许多重要的进展。

研究电力系统中性点接地方式的目的，主要在于正确认识和处理其中最常见单相接地故障问题。随着电力系统的延伸扩展，额定电压逐级升高，中性点接地方式也在发展变化。遵循电压、电流的互换特性这一基本理念，分别确定中压、高压、超高压和特高压电网的中性点接地方式，一般可获得比较合理的结果。而发电机、特别是大型发电机的中性点接地方式独具特色，适合采用谐振接地方式。

本书将根据科学发展与技术进步的观点，首先分析上述重要论断，重点讨论谐振接地方式的有关问题。主要内容包括：电力系统中性点接地方式概论，谐振接地原理，单相接地暂态过程，影响熄弧的因素，谐振接地方式的应用、优化、实施和效果以及异常现象分析和防护措施等。同时理论联系实际，在总结国内外电力系统运行经验的基础上，结合自己的研究成果，提出了一些看法和建议，希望对电力系统的发展和城乡电网的建设改造有所裨益。

吴维诚先生曾建议并关怀此书的著述，周庆昌先生审阅了书稿并提出许多宝贵的意见，在此谨向他们表示诚挚的谢忱，同时向许多给予关心和支持的同行朋友们表示衷心的感谢。

因时间和水平所限，疏漏、缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正，不吝赐教。

作者

2000年2月于厦门

目 录

CONTENTS

序言

第一章 电力系统中性点接地方式概论

第一节 导言	(1)	电流	(4)
第二节 中性点接地方式发展简史	(1)	三、电压与电流的互换特性	(7)
第三节 一个概念和几个术语	(2)	第五节 接地程度系数与中性点接地方式的关系	(9)
一、“零序阻抗”	(2)	第六节 不同接地方式系统的基本运行特性	(11)
二、“中性点不接地”和“中性点绝缘”	(2)	一、中性点有效接地和全接地系统	(11)
三、“中性点有效接地”和“中性点直接接地”	(2)	1. 有效接地系统	(11)
四、“中性点全接地”和“中性点非常有效接地”	(3)	2. 全接地(非常有效接地)系统	(12)
五、“中性点谐振接地”和“中性点经消弧线圈接地”	(3)	二、中性点非有效接地系统	(13)
六、“中性点非有效接地”	(3)	1. 中性点不接地系统	(13)
第四节 接地方式的划分及电压、电流的互换特性	(4)	2. 谐振接地系统	(14)
一、中性点接地方式的划分	(4)	三、中性点经电阻接地系统	(15)
二、非故障相工频电压和单相接地故障		四、几个有关的技术问题	(17)
		第七节 发电机中性点的接地方式	(18)
		第八节 不同接地方式的适用范围	(18)
		第九节 结语	(20)

第二章 谐振接地原理

第一节 引言	(22)	五、不同补偿状态下的残流特性	(28)
第二节 减小接地故障电流	(23)	第三节 降低故障相恢复电压的初速度	(28)
一、补偿电网的等值接线图	(23)	一、补偿电网电压恢复过程及相量图	(28)
二、单相接地故障时电压、电流相量图	(24)	二、故障相恢复电压的表达式	(29)
三、电流谐振等值回路	(24)	三、故障相恢复电压的初速度	(30)
四、失谐度、合谐度与阻尼率	(26)	四、故障相电压的恢复时间	(31)
1. 失谐度(ν)	(26)	第四节 接地电流电弧的熄灭	(31)
2. 合谐度(K)	(26)	一、交流电流电弧的熄灭	(32)
3. 阻尼率(d)	(27)	1. 有功电流的熄弧	(32)

2. 电感电流的熄弧	(32)	1. 断线后电容电流的变化	(42)
3. 电容电流的熄弧	(32)	2. 断线后的合谐度与失谐度	(42)
二、残余电流电弧的熄灭	(33)	3. 断线后位移度的计算	(43)
第五节 正常运行情况下的位移度	(33)	二、过补偿断线后的中性点位移圆	(43)
一、中性点残余电压	(34)	1. 单相断线后的位移度	(43)
二、不对称电压和不对称度	(34)	2. 两相断线后的位移度	(43)
1. 不对称电压 (\dot{U}_{00})	(34)	3. 单相和两相断线后的位移圆	(44)
2. 用百分值表示的不对称度 (u_{00})	(35)	三、欠补偿断线后的中性点位移圆	(45)
3. 用标么值表示的不对称度 (\dot{u}_{00})	(36)	四、不同补偿状态下断线位移度的比较	(47)
三、电压谐振等值回路	(37)	1. 过补偿状态下断线	(47)
1. 位移电压 (\dot{U}_0)	(37)	2. 欠补偿状态下断线	(48)
2. 位移度 (\dot{u}_0)	(39)	第七节 其他补偿装置的熄弧原理	(49)
四、正常运行情况下的位移度允许值	(40)	一、消弧变压器	(49)
第六节 断线故障状态下的位移度	(41)	二、接地故障三相补偿装置	(51)
一、断线故障状态下位移度的分析	(42)	第八节 结语	(52)

第三章 单相接地时的暂态过程

第一节 引言	(53)	2. 彼得和斯列宾理论	(61)
第二节 单相接地暂态过程	(53)	3. 别列柯夫理论	(63)
一、等值回路	(53)	二、国内外实测结果	(65)
二、暂态电容电流	(54)	1. 国内实测结果	(65)
三、暂态电感电流	(56)	2. 国外实测结果	(67)
四、暂态接地电流	(58)	三、实践经验	(68)
第三节 单相电弧接地过电压	(59)	1. 绝缘弱点容易扩大事故	(68)
一、理论分析	(59)	2. 高概率过电压危险性较大	(69)
1. 彼得生理论	(60)	第四节 结语	(70)

第四章 影响熄弧的因素

第一节 引言	(72)	二、对残流的影响	(79)
第二节 故障点的过渡电阻	(72)	三、对故障相恢复电压的影响	(81)
一、对中性点位移电压的影响	(73)	第三节 高次谐波电流分量	(81)
1. 位移电压分量 \dot{U}_0	(73)	第四节 有功电流分量	(82)
2. 位移电压分量 \dot{U}_0	(75)	一、泄漏电流	(82)
3. 位移度	(78)	二、零序回路的有功损耗	(83)

三、电晕损耗	(83)	一、线路的几何尺寸	(88)
四、消弧线圈的有功损耗	(84)	二、介电系数的变动	(88)
第五节 残流的无功分量	(84)	三、电容电流变化的实测结果	(90)
第六节 消弧线圈的伏安特性	(86)	第九节 风力的影响	(91)
第七节 系统频率和电压的波动	(87)	第十节 结语	(91)
第八节 电容电流的自然变化	(88)		

第五章 中压电网谐振接地

第一节 引言	(93)	5. 纵向电势	(104)
第二节 供电可靠性	(93)	6. 零序电流干扰	(104)
第三节 设备安全	(96)	三、高压电网产生的干扰及对策	(104)
第四节 人身安全	(98)	第七节 绝缘水平	(105)
一、接触电压和跨步电压	(98)	一、关于与国际接轨问题	(105)
二、电弧烧伤	(99)	二、关于降低绝缘水平问题	(105)
三、伤亡概率	(99)	三、关于污闪问题	(106)
第五节 继电保护选择性	(100)	第八节 电缆网络	(106)
一、历史回顾	(100)	一、电缆网络的电容电流	(106)
1. 增大故障点的有功电流	(100)	二、电缆网络的接地故障	(107)
2. 增大故障点的无功电流	(100)	三、不宜降低电缆的绝缘水平	(110)
3. 利用单相短路电流	(100)	1. IEC 对电缆额定电压的规定	(110)
4. 利用功率方向继电器	(100)	2. GB 对电缆额定电压的规定	(111)
5. 暂态电流首半波保护	(101)	3. 综合经济指标	(111)
6. 5 次谐波电流接地保护	(101)	第九节 不同接地方式下中压电网的	
二、微机接地保护	(101)	运行特性	(112)
三、国内外运行经验	(101)	一、一个常见的对照表	(112)
第六节 通信干扰与电磁兼容	(102)	二、中压电网的内部过电压	(112)
一、通信干扰的原因及危害	(102)	1. 中性点不接地电网	(112)
二、谐振接地限制干扰的效果	(103)	2. 中性点谐振接地电网	(113)
1. 音频干扰	(103)	三、对表 5-4 的商榷	(113)
2. 工频干扰	(103)	四、发展前景	(114)
3. 接触干扰	(103)	第十节 结语	(114)
4. 地电位升高	(103)		

第六章 高压电力系统谐振接地问题

第一节 引言	(117)	第二节 220kV 系统中性点接地方式的	
--------------	-------	----------------------	--

变迁	(117)	九、降低误操作和误动作概率	(127)
一、德国 220kV 补偿系统	(117)	十、重大事故分析释疑	(128)
二、瑞典 220kV 补偿系统	(118)	1. 大面积停电事故	(128)
第三节 154kV 谐振接地系统运行经验	(119)	2. 谐振过电压事故	(128)
一、提高系统运行的可靠性	(119)	第五节 对 110kV 系统中性点接地方式的几点看法	(128)
二、提高输电线路的耐雷水平	(119)	一、山区架空线路防雷问题	(128)
三、降低通信干扰到无害程度	(120)	二、联网问题	(129)
四、接地故障的选择性	(121)	三、线路极限长度问题	(129)
五、154kV 系统的残流问题	(122)	四、多点接地短路事故问题	(130)
第四节 110kV 谐振接地系统的实践	(123)	五、引进国外技术问题	(130)
一、成功地消除了大量线路故障	(124)	第六节 超高压、特高压系统的潜供电流电弧	(131)
1. 降低输电线路的雷击跳闸率	(124)	一、潜供电流电弧的产生	(131)
2. 减少台风引起的线路跳闸率	(124)	二、潜供电流的补偿	(132)
二、防止发电厂、变电所单相接地扩大事故	(125)	1. 自耦变压器	(132)
三、防止人员伤亡重大事故	(125)	2. 并联电抗器	(132)
四、减轻通信干扰	(125)	3. 中性点小电抗器	(132)
五、必要时可允许带故障运行	(126)	三、潜供电流电弧的熄灭	(132)
六、过渡阶段的线路接地保护	(126)	第七节 结语	(133)
七、绝缘配合与设备改造	(126)		
八、减轻维修工作量	(127)		

第七章 发电机中性点谐振接地

第一节 引言	(135)	1. 确定“安全接地电流”的必要性	(139)
第二节 发电机中性点不同接地方式的主要运行特征	(135)	2. 试验条件	(140)
一、中性点直接接地方式	(136)	3. 试验结果	(140)
二、中性点经低阻抗接地方式	(136)	4. 安全接地电流推荐值	(141)
三、中性点不接地方式	(137)	5. 运行实例	(142)
四、中性点经高电阻接地方式	(137)	第四节 高电阻接地方式	(143)
五、中性点经消弧线圈(谐振)接地方式	(137)	一、电弧接地暂态过电压	(143)
第三节 接地电流限值的研究与演进	(138)	二、接地故障电流的危害	(144)
一、德国	(138)	三、继电保护依然复杂	(144)
二、前苏联	(139)	四、单相接地故障切机问题	(144)
三、捷克	(139)	五、综合经济指标问题	(145)
四、中国	(139)	第五节 谐振接地方式	(145)
		一、安全防护定子铁心	(145)
		二、降低暂态过电压	(146)

三、提高接地保护灵敏度	(147)	可靠性	(148)
四、简化工频耐压试验	(148)	第六节 结语	(149)
五、提高发电机和电力系统的运行			

第八章 谐振接地方式的优化

第一节 引言	(151)	2. 磁阀式组合型装置	(167)
第二节 微机选线和微机接地保护装置	(151)	五、可控硅调节消弧装置	(168)
一、基波电量解析	(152)	1. 消弧变压器	(168)
1. 基波电压的变化	(152)	2. 消弧线圈	(170)
2. 基波零序电流的分布	(153)	六、调容式消弧线圈	(170)
二、有功电流接地保护	(156)	七、电流注入式消弧线圈	(171)
三、功率方向接地保护	(157)	1. 少数固定分接头消弧线圈加注入电流	(171)
四、谐波电流接地保护	(157)	2. 自动消弧线圈加注入电流	(171)
五、暂态电流接地保护	(158)	八、限压电阻的选择	(172)
六、负序电流接地保护	(159)	九、自动测控系统	(173)
1. 谐振接地电网	(159)	1. 变频信号法	(174)
2. 中性点不接地电网	(159)	2. 节点方程法	(174)
七、电流信号注入式接地保护	(159)	3. 调谐测算法	(174)
八、零序导纳接地保护	(160)	4. 状态比较法	(175)
九、残流增量接地保护	(161)	5. 相角控制法	(175)
第三节 自动跟踪补偿装置	(162)	6. 电流注入法	(175)
一、多级有载细调消弧线圈	(163)	第四节 需要说明的几个问题	(175)
二、无级连续调节消弧线圈	(163)	一、电阻接地方式问题	(176)
1. 动铁式	(163)	二、法国的实践经验	(176)
2. 动圈式	(164)	三、美国的现状问题	(177)
三、直流助磁式消弧线圈	(164)	四、日本的变迁问题	(177)
四、磁阀式补偿装置	(166)	五、中国的若干问题	(178)
1. 磁阀式消弧线圈	(166)	第五节 结语	(180)

第九章 谐振接地方式实施技术

第一节 引言	(183)	四、消弧线圈的型式	(185)
第二节 消弧线圈的参数选择	(183)	第三节 与变压器、发电机的配合	(185)
一、电网的电容电流	(183)	一、利用容量问题	(185)
二、消弧线圈的容量	(184)	二、附加损耗问题	(185)
三、消弧线圈的台数	(184)	三、接线方式问题	(186)

1. Y/ Δ 接线	(186)	2. 手动拉路	(196)
2. Y/Z接线	(187)	3. 清除故障	(197)
3. Y/Y接线	(187)	4. 持续时间	(197)
4. Y/Y/ Δ 接线	(188)	第七节 提高消弧线圈动作成功率的措施	(197)
第四节 消弧线圈的装设	(188)	一、采用自动消弧线圈	(197)
一、结点变电所	(188)	二、加装微机选线或微机接地保护装置	(198)
二、发电机中性点	(188)	三、消除绝缘弱点	(198)
三、附属设备及保护装置	(189)	四、降低不对称度	(198)
四、安装和试验	(189)	五、掌握消弧线圈伏安特性	(198)
第五节 消弧线圈的调谐与运行	(190)	六、掌握电容电流变化规律	(198)
一、位移度允许值	(190)	七、欠补偿运行须适当	(198)
二、残流无功分量允许值	(191)	八、合理分区运行	(199)
1. 恢复电压初速度	(191)	九、正确掌握失谐度	(199)
2. 恢复时间	(191)	十、提高运行管理水平	(199)
3. 恢复电压幅值	(191)	第八节 消弧线圈的实效	(199)
4. 最高过电压水平	(191)	一、瞬间单相接地故障时不断电	(199)
5. 高于线电压的过电压概率	(191)	二、永久性单相接地故障时不被动	(201)
6. 故障点的残流	(192)	三、对全网电力设备有保护作用	(201)
三、补偿状态	(192)	四、减少维护检修工作量	(202)
1. 电力网络	(192)	1. 线路设备	(202)
2. 发电机	(193)	2. 变电设备	(202)
四、运行灵活性	(193)	五、降低误操作与误动作概率	(202)
第六节 消弧线圈的操作	(194)	六、降低对接地装置的要求	(202)
一、正常情况下的操作	(194)	七、减少人身伤亡和设备损坏概率	(203)
1. 线路的操作	(194)	八、电磁兼容性好	(203)
2. 转移中性点的操作	(194)	第九节 结语	(204)
3. 分接头的转换操作	(195)		
二、接地故障的检出与清除	(196)		
1. 划分区域	(196)		

第十章 谐振接地系统的参数测量与计算

第一节 引言	(205)	1. 在消弧线圈投入状态下	(208)
第二节 残压测量与调谐试验	(205)	2. 在消弧线圈退出状态下	(208)
一、残压(含不对称电压)测量	(206)	二、误差分析	(209)
二、位移电压测量与调谐试验	(206)	1. 三相对称系统	(209)
第三节 电容电流的直接测量	(207)	2. 三相不对称系统	(210)
一、测量方法	(208)	3. 最大误差计算	(213)

4. 现场试验验证	(217)	五、电容增量法	(225)
三、安全注意事项	(218)	1. 计算公式	(225)
1. 清除绝缘弱点	(218)	2. 电容增量 ΔC	(226)
2. 接地断路器三相接点串联	(218)	3. 不对称电压增量 ΔU_{in}	(226)
3. 接地电流互感器加装保护间隙	(218)	4. 实测结果	(226)
4. 合理确定被试电网范围	(218)	5. 几个要点	(227)
5. 在接地状态下禁止操作线路断路器	(218)	六、人工不对称法	(227)
6. 缩减接地次数和持续时间	(218)	第五节 电容电流计算	(228)
7. 隔离 220V 试验电源	(219)	一、架空线路	(228)
8. 明确现场组织分工	(219)	1. 精确计算法	(228)
四、测量注意事项	(219)	2. 图表估算	(228)
1. 选好仪器准确等级	(219)	3. 经验公式	(229)
2. 适当测量有功电流	(219)	二、电力电缆	(229)
3. 所有仪表同时读数	(219)	三、电力网络	(230)
4. 适当增大接地电流	(219)	第六节 消弧线圈特性试验	(230)
5. 及时验算测量结果	(219)	一、伏安特性试验	(230)
6. 慎选测量导线	(220)	1. 电压谐振法	(232)
7. 归算整理试验结果	(220)	2. 电流谐振法	(232)
第四节 电容电流的间接测量	(220)	3. 变压器更改接线法	(232)
一、外加电容法	(220)	4. 发电机变压器组调压法	(232)
二、外加电压法	(221)	二、温升试验	(233)
三、调谐法	(222)	三、工频耐压试验	(234)
1. 测量零序电流	(223)	第七节 单相接地现场试验	(234)
2. 利用图解	(223)	一、现场消弧试验的几个要点	(234)
3. 通过估算	(223)	二、自动跟踪补偿装置调谐精度的 校验	(234)
四、变频法	(224)	三、微机选线和微机接地保护装置 动作情况的检验	(235)
1. 利用 f 和 I_0 的变化	(224)	第八节 结语	(235)
2. 利用 f 和 U_0 的变化	(225)		
3. 利用 f 、 I_0 和 U_0 的变化	(225)		

第十一章 消弧线圈的异常动作及损坏原因分析

第一节 引言	(237)	4. 负荷不平衡	(238)
第二节 异常动作原因分析	(237)	二、失谐度减小	(238)
一、不对称度增大	(238)	1. 电容电流随季节变化	(238)
1. 运行方式改变	(238)	2. 消弧线圈伏安特性不良	(239)
2. 线路断线	(238)	3. 电网频率波动	(239)
3. 非全相操作	(238)	4. 电网电压变动	(240)

三、电容、电磁耦合	(240)	一、振动引起元件损坏	(243)
1. 变压器高、低压绕组间电容耦合	(240)	二、涡流引起围屏烧毁	(243)
2. 同杆架设线路间电容耦合	(240)	三、耐压方法不当使绝缘击穿	(243)
3. 平行线路间电磁耦合	(240)	四、丝杠发热使绝缘油碳化变质	(244)
4. 直接电气连接	(241)	五、电流冲击引起绕组烧毁	(244)
四、其他原因	(241)	六、分接开关拒动、误动	(245)
1. 断开中性点带有消弧线圈的变压器	(242)	七、串联限压电阻过热	(245)
2. 电网阻尼率减小	(242)	八、自动测控装置失灵	(246)
3. 信号装置整定不当	(242)	第四节 结语	(246)
第三节 损坏和失灵原因分析	(242)		

第十二章 谐振接地系统的过电压及防止措施

第一节 引言	(247)	第七节 共用消弧线圈过电压	(255)
第二节 欠补偿断线过电压	(247)	一、过电压起因	(255)
一、事故前电网运行方式	(247)	二、防止措施	(256)
二、事故情况及原因分析	(248)	第八节 断开两相接地短路过电压	(256)
三、防止措施	(248)	一、44kV 补偿电网	(257)
第三节 地网电位升高过电压	(248)	二、110kV 补偿电网	(257)
一、过电压的产生	(249)	三、66kV 补偿电网	(257)
二、原因分析及对策	(249)	四、保护措施	(257)
1. 35kV 补偿电网	(249)	第九节 中性点不稳定过电压	(258)
2. 6.3kV 发电机回路	(249)	一、产生条件及现象	(258)
第四节 定相过电压	(250)	二、过电压机理	(258)
一、定相过电压的危害性	(250)	三、防止措施	(258)
二、过电压的起因	(250)	第十节 配电变压器高压绕组接地过电压	(259)
三、过电压的图解	(251)	一、研究结果	(259)
四、利用电阻定相杆定相	(252)	二、限制措施	(259)
第五节 线路碰线过电压	(252)	第十一节 断路器非全相投入过电压	(260)
一、线路导线相碰	(252)	一、事故简况	(260)
二、环流、中性点位移电压的计算	(253)	二、原因分析及防止措施	(260)
第六节 电容耦合过电压	(253)	第十二节 断线接地过电压	(261)
一、变压器高、低压绕组间电容耦合	(253)	一、事故简况	(261)
二、同杆架设线路间电容耦合	(255)	二、原因分析及对策	(261)
		第十三节 结语	(262)

第十三章 谐振原理在电力系统中的其他应用

第一节 引言	(263)	1. 调感式装置	(272)
第二节 大型发电机交流耐压试验	(263)	2. 调容式装置	(273)
一、定子绝缘的等值回路	(263)	3. 调频式装置	(273)
二、超低频交流耐压试验	(264)	第四节 电力变压器等三倍频感应耐压 试验	(274)
三、谐振工频耐压试验	(265)	一、3 倍频感应耐压试验装置	(274)
1. 并联谐振工频耐压试验	(266)	二、电力变压器 3 倍频感应耐压试验	(274)
2. 串联谐振工频耐压试验	(267)	三、电压互感器 3 倍频感应耐压试验	(275)
四、串联谐振工频耐压试验的优点	(269)	第五节 消弧线圈伏安特性和温升试验	(276)
第三节 电力电缆、电容器、GIS 串联谐振 工频耐压试验	(269)	一、伏安特性试验	(276)
一、电力电缆耐压试验	(270)	1. 常规并联谐振方法	(276)
二、电力电容器耐压试验	(271)	2. 串联谐振方法	(276)
三、气体绝缘组合电器 (GIS) 耐压 试验	(271)	3. 混联谐振方法	(277)
四、几种交流耐压试验装置	(272)	二、温升试验	(277)
		第六节 结语	(277)

电力系统中性点接地方式概论

第一节 总 论

电力系统的中性点接地方式是一个综合性的技术问题，它与系统的供电可靠性、人身安全、设备安全、绝缘水平、过电压保护、继电保护、通信干扰（电磁环境）及接地装置等问题有密切的关系。

电力系统中性点接地方式是人们防止系统事故的一项重要应用技术，具有理论研究与实践经验密切结合的特点，因而是电力系统实现安全与经济运行的技术基础。

电力系统中性点接地方式主要是技术问题，但也是经济问题。在选定方案的决策过程中，应结合系统的现状与发展规划进行技术经济比较，全面考虑，使系统具有更优的技术经济指标，避免因决策失误而造成不良后果。

简言之，电力系统的中性点接地方式是一个系统工程问题。

第二节 中性点接地方式发展简史

在发展初期，电力系统的容量较小，当时人们认为工频电压升高是绝缘故障的主要原因，即使相电压短时间升高至 $\sqrt{3}$ 倍，也会威胁安全运行。由于对过电流的一系列危害作用估计不足，同时对电力设备耐受频繁过电流冲击的能力估计过高，所以，电力设备的中性点最初都采用直接接地方式运行。

随着电力系统的扩大，单相接地故障增多，线路断路器经常跳闸，造成频繁的停电事故，于是，便将上述的直接接地方式改为不接地方式运行。

尔后，由于工业发展较快，使电力传输容量增大，距离延长，电压等级逐渐升高，电力系统的延伸范围不断扩大。在这种情况下发生单相接地故障时，接地电容电流在故障点形成的电弧不能自行熄灭，同时，间歇电弧产生的过电压往往又使事故扩大，显著地降低了电力系统的运行可靠性。

为了解决系统中出现的这些问题，当时世界上两个工业比较发达的国家分别采取了不同的解决途径。德国为了避免对通信线路的干扰和保障铁路信号的正确动作，采用了中性点经消弧线圈的接地方式，自动消除瞬间的单相接地故障；美国采用了中性点直接接地和经低电阻、低电抗等接地方式，并配合快速继电保护和开关装置，瞬间跳开故障线路。这两种具有代表性的解决办法，对后来世界上许多国家的电力系统中性点接地方式的发展产生了很大的影响。

近几十年来，在飞速发展的社会生产力的推动下，已经形成了遍布世界各地的强大电力系统。当今世界上已经有了从低压、中压、高压到超高压、特高压等多种电压等级的电力系

统。在不断深化的理论研究和日益丰富的运行经验的基础上，人们对中性点的各种不同接地方式有了更好的掌握，并进行了创造性的应用，使当今电力系统的建设发展和安全经济运行均达到了很高的水平。

随着科学技术的进步与生产水平的提高，世界已逐步进入信息社会和知识经济时代，用户对电能质量提出了新的和更高的要求。中性点接地方式作为理论与实践相结合的一项应用技术，服务于电力系统的安全运行，可使电力系统达到更优的技术经济指标。

第三节 一个基本概念的介绍

为了便于以后的分析与讨论，需要首先明确一个基本物理概念和几个技术术语，并澄清一些模糊的看法。

一、“零序阻抗”

零序阻抗是中性点接地方式问题中的一个基本物理概念。在电网不对称运行的状态下，回路电流和电压等运行参数呈现出不平衡状况，用对称分量原理可将该电流和电压分解为正序、负序和零序三个对称系统。各序电流所流经的回路阻抗，相应地称为正序、负序和零序阻抗，与正序、负序的电流和电压相比，零序电流和电压的特征是三相的相位完全相同。

各种中性点接地方式尽管表现方式有所不同，但究其实质，均可概括为中性点是经一定数值的零序阻抗接地的。这一基本概念的建立，可以导出适用于各种中性点接地方式的一般公式，便于进行分析与比较。在以后的讨论中我们将会看到，本书所讲的零序阻抗，是指电网在单相接地故障情况下，零序电流所经回路的阻抗。该阻抗不仅包括故障点与中性点之间的、由系统几何与物理参数所确定的回路阻抗，而且还包括这两点之间的大地回路构成的阻抗，而后者又与接地装置及大地的几何、物理参数等有关。这样，不同的中性点接地方式只不过是零序阻抗、或者是零序阻抗与系统正序阻抗的比值的大小不同而已。

二、“中性点不接地”和“中性点绝缘”

我国常用的中性点不接地这一术语，在有的国际场合称为“中性点绝缘”，后者容易使人误解为中性点的零序阻抗是无限大。而通常所讲的中性点不接地，实际上是经过集中于电力变压器中性点的等值电容（绝缘状态欠佳时还有泄漏电阻）接地的，其零序阻抗多为一有限值，而且不一定是常数。如在工频零序电压作用下，零序阻抗可能呈现较大的数值，因此零序电流数值较小；而在3次或更高次谐波的零序电压作用下，零序容抗锐减，高次谐波电流骤增，有时甚至在正常运行情况下也可引起通信干扰。显然，中性点绝缘的概念对这一现象就解释不通了，而必须用中性点经容抗接地这一概念来说明了。中性点不接地这一术语虽不理想，但习惯上已被国内外广泛地应用了多年，因而只要正确理解其物理意义就行了。本书将沿用这一技术术语。

三、“中性点有效接地”和“中性点直接接地”

“中性点直接接地”这一术语对电力设备（如变压器等）而言，含义是清晰的，它指该设备的中性点经过零阻抗接地。可是，现在很多人常用它泛指一个电力系统（或电网），这时其含义是不确切的，容易造成误解。这是因为，即使在高压电力系统中，也有部分变压器的中性点不接地运行；甚至在全接地的超高压和特高压电力系统中，仍然存在着有的变压器中性点经低电抗（低电阻）接地的情况。所以严格地讲，在一个电力系统中有一台或多台变

压器的中性点直接接地，这只能说明变压器中性点的运行情况，不能作为区分电力系统接地方式的标准。

美国电机工程师学会第 32 号标准对此作出了明确的规定：“当在系统或系统的指定部分的所有各点上，不论运行的情况如何，以及连接的发电机容量多大，零序电抗对正序电抗之比都不大于 3，而且零序电阻对正序电抗之比不大于 1 时，该电力系统或系统的一部分可被认为是中性点有效接地的。当电力系统不是全部有效接地，而在系统的一个指定部分的所有各点上，上述要求得到满足时，可认为该指定部分是有效接地的”^[1]。这个标准沿用至今，在国际上得到广泛的认同。

根据上述标准，当电力系统发生单相接地故障时，不论变压器的中性点是直接接地，还是经低电阻或低电抗接地，只要在指定部分的各点满足零序电抗与正序电抗之比小于或等于 3 ($\lambda_0/X_1 \leq 3$) 和零序电阻与正序电抗之比小于或等于 1 ($R_0/X_1 \leq 1$)，该系统便属于有效接地系统。由此可见，中性点有效接地不仅与系统中变压器中性点直接接地的数量有关，同时还与其容量占全部变压器总容量的百分值有关。而所谓的电力系统中性点直接接地方式，不能反映上述的内涵，在实际工作中容易引起误解，影响系统的安全运行。例如，随着我国经济的发展，高压输电线路直接深入城市中心，有些新建的 110~220kV 终端变电所变压器的中性点不接地运行，便有人认为出现了新问题。再如，有些人为了解决 10kV 断路器遮断容量不足的问题，未经校验便将 220、110kV 变电所的母联断路器解列运行等。由此可见，对于专业人员来讲，还是采用中性点有效接地这一术语更为贴切。

四、“中性点全接地”和“中性点非常有效接地”

对于超高压电力系统来说，由于广泛采用了省料、节能的自耦变压器，所以全部的中性点都保持直接接地，或在特殊需要时经低电抗（低电阻）接地运行。我国的 500kV 系统全部采用自耦变压器，其中性点的接地方式如此，世界各国的情况也相同。特高压电力系统的中性点接地方式更是如此，无一例外。这一中性点接地方式一般称为中性点全接地方式，也有人称之为中性点死接地方式。由于其零序阻抗远较中性点有效接地方式时为小，所以又可称为中性点非常有效接地方式。

五、“中性点谐振接地”和“中性点经消弧线圈接地”

中性点经消弧线圈接地时，虽然调谐电感只在一个不大的范围内变动，但系统的零序阻抗却接近，甚至几乎就是无限大。由于在后者情况下对熄灭接地电弧更为有利，故中性点经消弧线圈接地的电力系统最初曾有“共振接地”之称。不过，运行中的消弧线圈和现代的自动跟踪补偿装置并不都是恰好在谐振点运行，在一般情况下它们多采用略微偏离谐振点的过补偿运行方式。因“谐振接地”这一技术术语比较符合中性点经消弧线圈接地系统的实际情况，所以得到日益广泛的采用。这样，中性点经消弧线圈接地的电力系统通常称为谐振接地系统。

六、“中性点非有效接地”

一般说来，在电力系统各种中性点接地方式中，除了有效接地和全接地（即非常有效接地）方式之外，都属于中性点非有效接地的范畴。这个范畴包括以单相接地电弧能够自行熄灭为条件的中性点不接地、谐振接地和高电阻接地等小电流接地系统，以及接地电弧不能自行熄灭的中性点经中、低电阻和中、低电抗等接地的系统。

这里顺便指出，在中性点有效接地的 110、220kV 高压电力系统中，因运行方式的改变

或断路器的自行跳闸，有时也会在某一区域内形成非有效接地的部分，这时应及时采取措施，使整个系统全部恢复到有效接地方式运行。

关于中性点接地方式的这几个术语，在实用中比较容易混淆不清。其实，只要弄清它们的物理意义，并注意区分开所论对象是电力系统还是电力设备后，中性点接地方式的具体问题便清楚了。

第四节 接地方式划分及电压、电流的互换特性

电力系统的电压等级较多，不同额定电压电网的中性点接地方式也各有特点，适当地对其进行划分，有助于正确地理解、选择和处理相关的问题。

一、中性点接地方式的划分

我国早期的《接地技术规程》中曾规定，不论电力系统中性点的接地方式如何，只要单相接地电流或同点两相接地时的入地电流大于 500A，则称为大接地短路电流系统；反之，则称为小接地短路电流系统。由于此项规定不大合理，所以在后来修订为 SDJ8—79《电力设备接地设计技术规程》时，已被删除。

国外电力系统中性点接地方式的划分各有特点。例如，美国与加拿大根据自己的国情规定，单相接地短路电流值处在三相短路电流的 0~25% 范围内，为小电流接地系统；在 25%~100% 范围内，为大电流接地系统；而接地电流大于 100% 并小于 150% 时，为非常大电流接地系统。不过，如此划分也存在一些问题。

在中压范围内，我国和许多国家的电网普遍采用小电流接地方式，其单相故障接地电弧能够自行熄灭，是一个突出的特点，这应当是进行小电流接地系统范围界定的必要与充分条件。而按美、加的划分方法，势必有一部分单相故障接地电弧不能自行熄灭的系统也被划分在小电流接地系统之中了。显然，这个观点是不大合理的。其他一些国家也有类似的划分方法，把单相接地故障电流为数十安和数百安的系统也划分到小电流接地系统之中了^[2]。不言而喻，这同样是不合理的。

电力系统的中性点接地方式虽然有多种表现形式，但根据上述原则，基本上可以划分为两大类：凡是需要断路器遮断单相接地故障者，属于大电流接地方式；凡是单相接地电弧能够瞬间自行熄灭者，属于小电流接地方式。

在大电流接地方式中，主要有：①中性点有效接地方式；②中性点全接地方式，即非常有效接地方式。此外，还有中性点经低电抗、中电阻和低电阻接地方式等。

在小电流接地方式中，主要有：①中性点谐振（经消弧线圈）接地方式；②中性点不接地方式；③中性点经高电阻接地方式等。

在非有效接地方式中，以谐振接地方式最受关注，其中涉及的技术问题较多，近来发展变化也较快。运行特性也已得到优化。

二、非故障相工频电压和单相接地故障电流

电力系统在正常运行中，对不同的中性点接地方式及其差异，基本上没有反映。可是，当系统发生单相接地故障时，情况则大不一样了。因中性点接地方式的不同，非故障相工频电压的升高和单相接地故障电流的大小也不相同。通常，以两者的具体数值表征不同接地方式系统的基本运行特性。分析存在于两者之间的互换特性，可以展示出各种不同接地方式之