

上海超高压输变电公司 编



超高压输变电操作技能培训教材

继电保护

DIAN BAOHU

(第六册)



首套500kV超高压输变电
操作技能指定培训教材



依据规范编写、只讲操作
技能、突出岗位技能鉴定



全国500kV超高压输变电系统
安全操作和技能考核规范范本



全国各网省市超高压输变电企业
运行维护、检修试验等生产人员



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

超高压输变电操作技能培训教材

继电保护 (第六册)

上海超高压输变电公司 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内容提要

随着电力系统输电容量不断增大, 500kV 及以上超高压已成为输变电网络的主要电压等级。为了满足全国联网和西电东送的战略决策以及超高压交直流输电建设和运行的需要, 根据国家标准、行业标准和《电力行业职业技能鉴定规范》以及有关输电运行岗位规范等的要求, 并结合 500kV 超高压输电运行的实际情况, 上海超高压输电公司在总结多年来超高压输电运行经验和教育培训的基础上组织编写了《超高压输电操作技能培训教材》(一套 7 册), 以满足全国超高压输电企业为适应超高压输电网发展所需的队伍建设、岗位培训和技能鉴定的培训需要。

《继电保护》是本套教材的第六册, 共分 8 章, 主要内容是: 第一章电力系统知识, 包括电力系统基本知识、调度规程选录及现场工作技术要点; 第二章高压互感器, 包括电流互感器和电压互感器; 第三章线路保护, 包括高频保护、光纤纵联保护、距离保护、零序保护及就地判别装置; 第四章母线差动保护和断路器失灵保护, 包括母差保护、断路器失灵保护、短线保护、保护接线和保护检验; 第五章电力变压器保护, 包括差动保护、后备保护、保护调试方法等; 第六章自动装置, 包括按频率装置、自切装置、重合闸装置、STATCOM 保护及故障录波仪; 第七章二次回路, 包括各种典型的控制回路、操作箱、隔离开关操作回路、断路器操作回路、典型二次异常情况处理、直流监测设备及中央信号设备等; 第八章继电保护及自动装置反事故措施。另外, 各章均配有复习思考题。

本书既可作为全国超高压输电企业继电保护运行、调试、设计、施工和制造等生产人员、技术人员和管理干部等新岗、上岗、转岗、再岗的岗位技能培训和职业技能鉴定的培训教材, 也可作为电力职业专科学校和电力大本专院校的专业课程教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

继电保护/上海超高压输电公司编. —北京: 中国电力出版社,

2007

超高压输电操作技能培训教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5503 - 0

I. 继… II. 上… III. 电力系统 - 继电保护 - 技术培训 - 教材

IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 058503 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>)
北京丰源印刷厂印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 27.5 印张 736 千字
印数 0001—4000 册 定价 54.00 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

序



当前, 由于全国联网和西电东送的国家战略决策以及超高压交直流输变电的迅速发展, 电力系统输变电容量不断增大, 电压等级逐步升高, 500kV 及以上超高压已成为输变电网络的主要电压等级。因此, 在 500kV 超高压输变电生产人员、技术人员和管理干部等的培训领域迫切需要一套完整而又贴近生产实际情况的超高压输变电操作技能培训教材, 以加快 500kV 超高压输变电各专业岗位技能和职业技能人才的培养步伐。

为此, 根据原国家电力公司、中国电力企业联合会、国家电网公司、中国南方电网有限责任公司等对超高压输变电岗位技能、职业技能等提出的培训要求, 从 2001 年开始, 在上海市电力公司的领导下, 上海超高压输变电公司组织了 500kV 超高压输变电各专业领域、多年运行经验的 30 多位技术人员和专家, 根据国家标准、行业标准和《电力行业职业技能鉴定规范》以及有关输变电运行岗位规范等的要求, 并紧密结合 500kV 超高压输变电运行维护的实际情况, 精心编写了这套由七个专业组成的《超高压输变电操作技能培训教材》(一套 7 册), 以充分反映我国当前 500kV 超高压输变电实际运行技术水平和最新发展状况, 并以满足全国超高压输变电企业为适应超高压输变电发展所需的队伍建设、岗位培训和技能鉴定的需要。

《超高压输变电操作技能培训教材》分册是: 第一册 变电运行; 第二册 变电设备检修; 第三册 变电所自动化与监控; 第四册 输电线路; 第五册 交直流电源与计量; 第六册 继电保护; 第七册 电力通信。

由于这套教材是针对岗位技能和职业技能培训而编写的, 因此在内容安排上突出了操作技能的特点, 除了专业原理和结构的讲解外, 更加侧重实际运用和运行操作的介绍, 在培训功能上具有较强的针对性和实用性, 既可作为超高压输变电岗位技能培训和职业技能鉴定的培训教材, 也可作为电力专业大专院校学生的课程教材, 尤其能为新进输变电企业的大中专毕业生尽快适应本职工作提供了帮助和学习教材。本书的编写出版得到了同行业技术专家和中国电力出版社的热情支持, 在此, 我谨代表编委会向他们表示衷心感谢。

上海超高压输变电公司总经理

沈尧新

2007 年 3 月

前 言



随着社会的发展,人民生活水平的不断提高,社会对电力的依赖程度越来越大。为适应大电网发展的需要,相继出现的超高压电网和大容量机组,使电网结构日益复杂,确保电网安全稳定运行对电力系统继电保护技术和管理水平提出了更高的要求。随着继电保护新技术、新原理、新装置不断出现,继电保护新人员不断补充,迫切需要一本系统阐述继电保护原理与实用技术的培训教材。为适应继电保护形势发展的需要,不断提高继电保护人员素质和继电保护技术及装置的运行管理水平,培养一支高素质的管理队伍和技术队伍,上海超高压输变电公司组织有关专家和继电保护专业人员编写了《超高压输变电操作技能培训教材》(继电保护)一书。

本书结合上海电网继电保护实际,总结归纳多年培训经验,理论联系实际,注重继电保护新技术的应用,充分反映现场继电保护人员的需要,体现了“有用、实用”的原则。本书适合从事继电保护运行管理、调试、设计、施工、制造等部门的专业人员,从事电网运行管理的相关专业人员以及发供电单位相关专业运行管理人员使用。

本书注重理论联系实际,既有继电保护基础理论,又结合继电保护规程、规定和反措,讲解电网继电保护运行知识;基础理论的编写有别于一般教科书,电网故障分析紧紧围绕继电保护装置展开,为保护动作行为分析提供坚实的理论基础。

本书由乔卫东主编,编写人员有涂崎、李坤、朱莹、荣吉良、励君、陆敏珏、傅超豪、叶康、杜科、柏强、叶建国等同志,并得到邹俭审核与帮助。

由于编者水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2007年3月

目 录



序 前言

第一章 电力系统知识

1

第一节 电力系统基础知识 1

一、电力系统稳定性 (1) 二、电力系统振荡 (3) 三、电力系统接地方式 (4) 四、电力系统简单不对称故障分析 (8) 五、有名制与标幺制 (21) 六、长线路短路暂态分析 (22)

第二节 调度规程选录 27

一、哪些设备由继电保护专业人员维护和检验 (27) 二、继电保护专业部门应了解、掌握的设备及内容是什么 (27) 三、新安装继电保护装置竣工后其验收的主要项目是什么 (27) 四、新安装的继电保护装置出现不正确动作后其划分责任归属的原则是什么 (28) 五、什么情况下应该停用整套微机继电保护装置 (28) 六、微机继电保护投运时应具备哪些技术文件 (28) 七、微机继电保护装置的定检周期是怎样规定的 (28) 八、在微机继电保护装置中的检验应注意哪些问题 (28) 九、微机继电保护装置的现场检验应包括哪些内容 (29) 十、微机继电保护屏应符合哪些要求 (29) 十一、微机线路保护的新程序使用前网(省)调度继电保护试验室应做哪些静态模拟试验 (29) 十二、什么是主保护、后备保护、辅助保护和异常运行保护 (30) 十三、在 110~220kV 中性点直接接地电网的线路保护中装设全线速动保护应遵循哪些原则 (30) 十四、在 110~220kV 中性点直接接地电网的线路保护中后备保护的装设应遵循哪些原则 (30) 十五、在 330~500kV 中性点直接接地电网中对继电保护的配合和装置的性能上应考虑哪些问题 (30) 十六、对 330~500kV 线路应按什么原则实现主保护的双重化 (31) 十七、330~500kV 线路的后备保护应按什么原则装设配置 (31) 十八、母线保护的装设应遵循什么原则 (31) 十九、什么情况下应装设断路器失灵保护 (32) 二十、采用单相重合闸时应考虑哪些问题 (32) 二十一、控制电缆的选用和敷设应符合哪些规定 (32) 二十二、220kV 及以上电网继电保护的运行整定工作的根本目标是什么 (33) 二十三、如何保证继电保护的可靠性 (33) 二十四、为保证灵敏度而接地故障保护最末一段定值应如何整定 (33) 二十五、系统最长振荡周期一般按多少考虑 (33) 二十六、线路距离保护振荡闭锁的控制原则是什么 (33) 二十七、自动重合闸方式的选定一般应考虑哪些因素 (33) 二十八、配合自动重合闸的继电保护整定应满足哪些基本要求 (34) 二十九、母线差动保护因故停用的一般应如何处理 (34) 三十、变压器中性点接地方式的安排一般如何考虑 (35) 三十一、零序电流保护与重合闸方式的配合应考虑哪些问题 (35) 三十二、如何计算接地距离保护的零序电流补偿系数 (36) 三十三、对线路两侧高频相差保护 $\dot{I}_1 + K \dot{I}_2$ 操作滤波器 K 值的选取有什么要求 (36) 三十四、自动重合闸的动作时间如何整定 (36) 三十五、选相元件拒动后备回路跳三相的延时整定应满足什么要求 (37) 三十六、母线差动保护的电压闭锁元件定值如何整定 (37) 三十七、断路器失灵保护的相电流判别元件定值应满足什么要求 (37) 三十八、低电压、负序电压、零序电压闭锁元件定值如何整定 (37) 三十九、中性点经间隙接

地的变压器中性点放电间隙的零序电流、零序电压保护如何整定 (38) 四十、继电保护现场工作中的习惯性违章主要表现有哪些 (38) 四十一、继电保护装置的检验一般可分为哪几种 (38) 四十二、检查二次回路的绝缘电阻应使用多少伏的绝缘电阻表 (38) 四十三、新投入或经更改的电流电压回路应利用工作电压和负荷电流进行哪些检验 (39) 四十四、断路器和隔离开关经新安装装置检验及检修后的继电保护试验人员需要了解哪些调整试验结果 (39) 四十五、对中间继电器应进行哪些检验 (39) 四十六、对辅助变流器应进行哪些检验 (40) 四十七、现场如何测定保护装置的动作时间 (40) 四十八、测定不同类型保护装置的动作时间时应对所通入的模拟故障电气量有什么要求 (40) 四十九、整组试验时对通入保护屏的直流电源有什么要求 (41) 五十、整组试验中应着重检查哪些问题 (41)

第三节 现场工作技术要点..... 42

一、总的方面 (42) 二、二次回路 (43) 三、带电工作 (47) 四、整定校验 (48) 五、备用电源自切装置投入 (49) 六、和电流保护 (49) 七、启动失灵回路和连锁跳闸 (49) 八、母线差动保护 (50) 九、线路差动保护 (50) 十、故障录波仪 (51) 十一、低频率保护 (51)

复习题 51

第二章 高压互感器..... 53

第一节 电流互感器 53

一、电流互感器工作原理 (53) 二、电流互感器误差及产生误差的原因 (53) 三、保护用电流互感器准确度级 (54) 四、电流互感器 10% 误差曲线 (54) 五、电流互感器 10% 误差试验及计算步骤 (54) 六、超高压系统继电保护对电流互感器特殊要求及对带气隙电流互感器简介 (59) 七、电流互感器二次运用中需注意的若干问题 (60) 八、电流互感器二次回路接地要求 (62)

第二节 电压互感器 62

一、电压互感器误差 (62) 二、常用电压互感器接线方式 (63) 三、双母线系统电压互感器直流回路接线 (64) 四、电压互感器二次运用中需注意的若干问题 (66)

第三节 研究和开发中的互感器 67

一、光仪用互感器 (67) 二、Rogowski 线圈电流传感器 (67)

复习题 67

第三章 线路保护..... 68

第一节 高频保护 68

一、概述 (68) 二、闭锁式纵联方向保护原理 (69) 三、允许式纵联方向保护原理 (75) 四、闭锁式与允许式纵联方向保护的比较 (76) 五、纵联距离保护 (76) 六、高频保护基本概念 (81) 七、常用收发信机 (88) 八、典型微机保护中纵联保护和专用收发信机 (89) 九、装置与各种通道接口的配合及相关问题 (94) 十、纵联差动保护相关调试 (103)

第二节 典型光纤纵差保护校验规程..... 116

一、电流差动制动特性校验方法 (116) 二、RCS-931A 差动校验流程 (118) 三、REL-551 校验流程及方法 (120)

第三节 线路距离保护 122

一、距离保护基本原理 (122) 二、阻抗继电器 (126) 三、工频变化量距离继电器 (128) 四、阻抗继电器接线方式 (130) 五、影响阻抗继电器正确测量的因素 (131) 六、距离保护振荡闭

锁 (134) 七、距离保护断线闭锁 (136) 八、距离保护装置主要技术性能要求 (139)	
第四节 零序电流保护	142
一、概述 (142) 二、零序网络和零序电流电压分布 (142) 三、零序电压和零序电流互感器 (144) 四、零序电流保护 (144) 五、零序方向继电器应用 (146) 六、典型微机保护中零序电流保护 (148)	
第五节 就地判别装置原理与应用	152
一、远方跳闸就地判别原理 (152) 二、WYP-01 型微机远方跳闸就地判别装置简介 (154)	
复习题	156
第四章 母线差动保护和断路器失灵保护	158
第一节 母线差动保护基本要求	158
一、对保护用电流互感器的性能要求 (158) 二、母线差动保护自身特殊要求 (160)	
第二节 几种母线差动保护	161
一、母线完全差动保护 (161) 二、中阻式母线比率差动保护 (163)	
第三节 断路器失灵保护与短线保护	164
一、断路器失灵保护 (164) 二、短引线保护 (166)	
第四节 典型母线差动保护接线	167
一、电磁型母线差动保护 (167) 二、REB-103 母线差动保护 (170)	
第五节 母线差动保护检验	180
一、以 REB-103 为例介绍相关母线差动保护的检验项目 (180) 二、以 REB-103 为例介绍母线差动保护的运行注意事项 (186)	
复习题	189
第五章 电力变压器保护	190
第一节 变压器差动保护	190
一、励磁涌流影响及对策 (190) 二、二次接线方式 (192) 三、主变压器参数计算 (193) 四、比率制动差动保护 (194) 五、针对接地故障的差动保护 (196)	
第二节 变压器后备保护	198
一、相间故障后备保护 (198) 二、接地故障后备保护 (199) 三、其他后备保护 (200)	
第三节 变压器保护配置实例	202
一、500kV 主变压器保护配置情况 (202) 二、220kV 主变压器保护典型配置情况 (204)	
第四节 几种主变压器保护装置	207
一、RET521 差动保护简介 DIFP (207) 二、三相定时限过电流保护 TOC (212) 三、制动式接地故障保护 REF (215) 四、接地故障定时限电流保护 TEF (218) 五、单相/三相定时限过电压保护 TOV (222) 六、单相/三相定时限欠电压保护 TUV (222) 七、中性点定时限电压保护 NOV (223) 八、热过负荷保护 THOL (224) 九、过励磁保护 OVEX (225)	
第五节 主变压器保护调试规程	227
一、RET316 变压器差动保护装置检验 (227) 二、RET316 主变压器差动保护检验报告 (234) 三、带负荷测试报告 (238) 四、RET316 装置原理 (240) 五、RET316 主变压器保护制动特性定量分析 (250) 六、RET316×4 整定操作手册 (251) 七、RET316×4 继电器序列号及保护配	

置 (254)	
第六节 变压器差动保护调试概述	256
一、差动元件基本原理 (256) 二、电流互感器二次电流相位补偿 (258) 三、平衡系数 (260)	
第七节 变压器差动部分测试	261
一、六路电流测试仪 (261) 二、六路电流测试仪测试 WBZ-500H 装置 (262) 三、三路电流测试仪对 Y $\rightarrow$ Δ 内转角差动保护的测试 (263) 四、三路电流测试仪测试 PST-1200 装置 (265) 五、三路电流测试仪测试 CST31AE 装置 (268) 六、三路电流测试仪测试 LFP-972 装置 (269) 七、三路电流测试仪对 $\Delta\rightarrow$ Y 内转角差动保护的测试 (271) 八、三路电流测试仪测试 RCS-978 装置 (272)	
第八节 变压器制动判据及其测试	274
一、制动判据 (275) 二、谐波制动测试 (276) 三、间断角制动测试 (279)	
第九节 REF-511 阻抗继电器检验	280
一、REL-511 阻抗继电器 (500kV 侧) 检验 (280) 二、REL-511 阻抗继电器 (220kV 侧) 检验 (285)	
复习题	290
第六章 自动装置	292
第一节 按频率自动减负荷装置	292
一、概述 (292) 二、静态频率特性 (293) 三、动态频率特性 (294) 四、实现按频率自动减负荷装置的基本原则 (294) 五、微机型按频率自动减负荷装置 (297)	
第二节 备用电源自动投入装置	299
一、概述 (299) 二、自动投入装置分类及特点 (299) 三、典型接线及动作原理 (300)	
第三节 自动重合闸装置	310
一、概述 (310) 二、自动重合闸装置分类 (310) 三、自动重合闸装置特点 (311) 四、三相一次自动重合闸基本原理 (312) 五、自动重合闸与继电保护配合 (318) 六、综合自动重合闸介绍 (320) 七、综合重合闸构成原则及要求 (322) 八、典型综合重合闸动作行为分析 (323) 九、常用自动重合闸装置介绍 (327)	
第四节 静止无功补偿成套装置	329
一、概述 (329) 二、装置 IGCT 阀体简述 (334) 三、装置控制及保护系统 (340) 四、装置监测及故障诊断系统 (342) 五、装置辅助设备 (343)	
第五节 故障录波仪	345
一、故障录波仪原理简介 (345) 二、YS-88A 型电力故障录波测距装置 (348) 三、BEN-5000 故障录波装置 (355)	
复习题	360
第七章 二次回路	361
第一节 典型操作箱	361
一、操作箱作用 (361) 二、在操作箱回路上工作要点 (365) 三、FCX-12HS 操作箱 (366) 四、CZX-12A 操作箱 (373) 五、JFZ-12FBZ/SH 分相操作箱 (381)	
第二节 典型隔离开关二次回路	385

一、隔离开关控制 (385) 二、隔离开关闭锁 (386) 三、隔离开关辅助触点应用 (391)	
第三节 中央信号及其他信号装置	394
一、事故信号 (394) 二、预告信号 (400) 三、保护装置动作和自动重合闸动作信号 (403) 四、 指挥信号 (404)	
复习题	405
第八章 继电保护及安全自动装置反事故措施	407
第一节 直流熔断器与相关回路配置反事故措施	407
一、基本要求 (407) 二、直流熔断器配置原则 (407) 三、继电保护直流回路的接线原则 (408) 四、其他配置要求 (408) 五、配置实施总则 (408) 六、不设置闪光母线的变电所配置实施 原则 (408) 七、设置闪光母线的变电所配置实施原则 (409) 八、负荷双联端子配置 (410) 九、其他重视事项 (410)	
第二节 保护二次回路反事故措施	411
一、保护装置用直流中间继电器、跳 (合) 闸出口继电器及相关回路 (411) 二、信号回路 (412) 三、跳闸连接片 (412) 四、保护二次回路电压切换 (412) 五、保护二次回路反事故 措施注意事项 (412)	
第三节 保护回路安装反事故措施	414
一、保护屏 (414) 二、保护装置本体 (414) 三、开关场到控制室的电缆线 (414) 四、户外端子 箱和汇控柜技术要求 (415) 五、保护回路安装其他措施要求 (416)	
第四节 仪用互感器反事故措施	417
一、仪用互感器及其二次回路 (417) 二、根据反事故措施要点和现场实际中遇到的问题还需注 意的问題 (418)	
第五节 保护原理反事故措施	418
一、保护原理反事故措施 (419) 二、反事故措施实例 (420)	
第六节 现场调试及运行反事故措施	421
一、现场试验 (421) 二、现场运行 (422) 三、其他要求 (423)	
复习题	424
参考文献	425

第一章

电力系统知识

第一节 电力系统基础知识

一、电力系统稳定性

对电力系统而言,安全性首当其冲,电力系统的安全性包括安全与稳定两个方面。所谓安全,是指电力设备不得超出其额定工作范围运行。所谓稳定,是指连续不断向负荷供电的状态。在电力系统中,有三种必须同时满足的稳定性要求,即同步稳定性、频率稳定性和电压稳定性。

1. 同步稳定性

同步稳定性可分为静态稳定性、暂态稳定性与动态稳定性。

(1) 静态稳定性是指电力系统受到小干扰后,不发生非周期性的失步,自动恢复到起始运行状态的能力。为了保持静态稳定,由电源经线路向受电系统传输的有功功率不得超过某一定值。一旦达到此定值,无论电源侧还是受电侧的任何负荷波动,都将使通过这一送电回路的电流、母线电压和线路传输功率发生发展性的连续巨大波动,正常的送电状态受到破坏,而使供电不能继续。

如图 1-1 所示,取由母线流向线路的方向规定为电流正方向,同时取母线电压为电压升,即视为电源电压。

以受端系统等价内电动势 $\dot{E}_N$ 为基准,取 $E_N \angle 0^\circ$, 令发电电源内电动势为 $\dot{E}_M \angle \delta$, δ 为正,表示 $\dot{E}_M$ 相位超前,可得

$$\dot{I}_M = -\dot{I}_N = (\dot{E}_M \angle \delta - \dot{E}_N \angle 0^\circ) / Z \angle \alpha$$

式中, $Z \angle \alpha$ 表示电源侧阻抗 $\dot{Z}_M$ 、线路阻抗 $\dot{Z}_L$ 与受端系统等价阻抗 $\dot{Z}_N$ 之和 ($\alpha \leq 90^\circ$)。

由 $\dot{S} = P_M - jQ_M = \dot{E}_M \times \dot{I}$, 取 $\alpha = 90^\circ$ 可得

$$P_M = E_M E_N \sin \delta / Z \quad (1-1)$$

$$Q_M = E_M / Z (E_M - E_N \cos \delta) \quad (1-2)$$

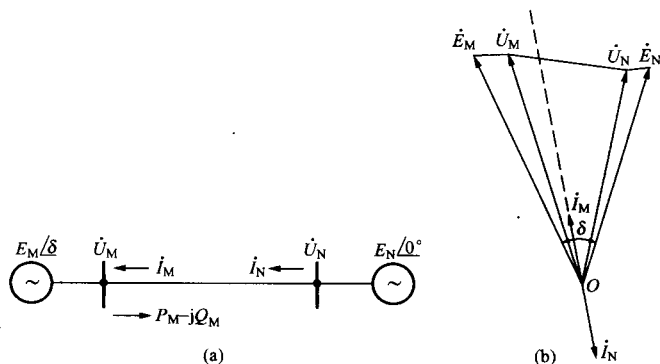


图 1-1 单线接线与电压相量图

(a) 单线接线及其回路计算; (b) 电压相量图

这是最重要的送电公式。其中，式（1-1）说明了：送电回路可能传输的最大有功功率 $P_{\max} = E_M E_N / Z$ ，发生于 $\delta = 90^\circ$ 的时候。

如果送电功率低于 $P_{\max}$ ，则此一送电回路可以经受正常运行时不大的负荷波动；如果送电功率等于 $P_{\max}$ ，则任何微小的负荷增长，都会将使送电成为不可能，即发生了稳定破坏，这种稳定破坏的方式叫做失去静稳定。为保证电网稳定运行，电网中任何回路的有功功率，都必须小于其静稳边界值，并留有一定的裕度。在单机对无穷大系统和双机系统的特定情况下，送电功率的机值表现为 $\delta \leq 90^\circ$ 。

式(1-1)还说明,有功功率总是从内电动势角相对领先的电源侧送向系统;式(1-2)则说明,无功功率总是从电压较高的母线向相邻电压较低的母线方向送出,而线路电容有时会影响线路两侧的无功功率分配。

(2) 暂态稳定是指电力系统受到大干扰后, 各同步发电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来的稳定运行方式的能力。在电网中, 经常发生的大干扰是短路故障。因此, 继电保护的动作情况直接关系到电力系统的暂态稳定性。

$$\begin{aligned} \int_{\delta_0}^{\delta_k} M \frac{d\delta}{dt} d\Omega &= \int_{\delta_0}^{\delta_k} M \omega_0 (\Omega - 1) d\Omega = 0 \\ \int_{\delta_0}^{\delta_k} (P_m - P_e) d\delta &= \int_{\delta_e}^{\delta_k} P_m d\delta - \int_{\delta_e}^{\delta_k} (P_m - P_{\max} \sin \delta) d\delta = 0 \\ \int_{\delta_0}^{\delta_k} P_m d\delta &= \int_{\delta_0}^{\delta_k} (P_{\max} \sin \delta - P_m) d\delta \end{aligned} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表示了保持暂态稳定的必要条件, 它对应于图 1-2 中由 A 及 B 所代表的面积相等, 这就是著名的“等面积准则”。其中, M 表示发电机组的惯性常数; P_m 表示发电机组转子输出的等效电功率; P_e 为发电机组定子输出的电功率; ω_0 为额定电频率; Ω 为标幺角速度; δ 为功角。

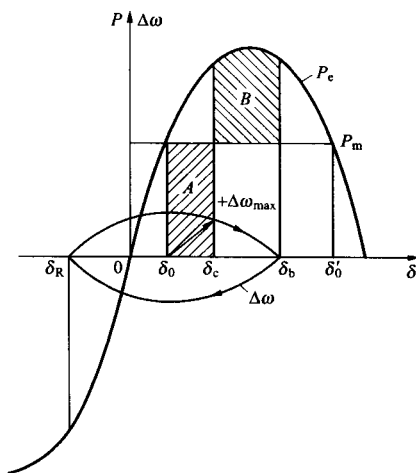


图 1-2 单回线送电回路功角图

如果因为送电功率过大,或故障切除时间过长,致使面积 A 大于面积 B 时,送电系统将失去稳定,图1-2中左侧说明了失去稳定后第一周期的各参量变化情况。在故障切除后第一次到达相应于 δ_b 的不稳定平衡点时, $\Delta\omega$ 仍大于零, δ 继续增大,但 P_e 却随之反而减小,发电机组继续获得加速功率,转速将再次增加。

曲线 P_m 与 P_e 在 δ_b 后所包围的面积均为加速面积, 机组滑差 s 不断增大, 机组出现了非同步功率, 同时调速器也可能开始作用, 减小机械输出, 降低 P_m 的数值。

在正常情况下，如果传输的 P_m 略大于 P_{max} ，则同样会产生上述情况，亦即失去静稳定。

在现场,判定系统发生振荡的最典型标志是,所有母线电压、线路电流以及有功功率、无功功率表的指示产生快速的大幅摆动。确定在振荡过程中,送电侧发电机组转轴的平均转速为 $\omega_0 + \Delta\omega$, $\Delta\omega$ 为正值。对于两机

电压的数值依振荡周期 $1/\Delta f$ 而作周期性变化，而线路传输功率在一个振荡周期内完成一次正负值交替的循环变化。

(3) 动态稳定是指电力系统受到干扰后，在自动调节和控制装置的作用下，能够保持长过程的运行稳定性的能力。

产生动态不稳定的根本原因，是系统的阻尼力矩为负值。无论发生任何扰动引起的系统运行状态波动，均将因此而使振荡逐渐发散，或者最终引起系统暂态稳定破坏，或者由于系统某些参数的非线性而使振荡的振幅最终趋于某一定值。

综上所述，如失去同步稳定性，即系统发生振荡，引起系统中枢点电压、发电设备和输电线路的电流和电压大幅度的周期性波动，电力系统因不能正常向负荷供电而不能继续运行。电力系统振荡是最常见的一类故障，必须努力避免。

2. 频率稳定性

失去频率稳定性，即发生系统频率崩溃而招致系统全停电，这是绝对需要避免的一种恶性事故。对于交流联网系统，系统容量越大，发生全局系统频率崩溃可能性越低，但一旦发生则后果越严重。按频率自动减负荷是针对频率崩溃最有效的手段。

3. 电压稳定性

失去电压稳定性，即发生电压崩溃，使受影响的区域停电，但在供电变压器自动调压普遍采用之后，它将逐渐发展成为全网性大停电。在整体电网缺少无功补偿的情况下，由于自动调压的不正确运用，各负荷中心仍力图维持本地正常电压水平，使主网电压严重下降而导致连锁停电，是一种电力系统现代化的病症。这明确地表明，依照主网电压允许条件维持地区电压于相适应的水平，是避免发生全网性电压崩溃的重要举措。

电力系统稳定性可以通过加强和扩充一次设备得到提高，具体措施有以下几方面：

(1) 减小线路电抗。可以采用增加并联运行输电线的回路数和复合导线等方法减小系统的总阻抗，改善系统稳定性及电压水平。

(2) 线路上装设串联电容。在线路上装设串联电容，可有效地减小线路电抗，比增加多回线路要经济，但技术比较复杂。

(3) 装设中间补偿设备。在线路中间装设同步调相机或电容器，能有效地保持变电所母线电压及提高系统稳定性。静止无功补偿 (Statcom) 可以快速地调整和供给系统无功功率，是提高系统稳定性的重要手段。

(4) 直流输电。由于直流电源不存在相位问题，所以用直流进行远距离输电，就不存在由发电机间相角确定的功率极限问题，不受系统稳定的限制。

电力系统在发生故障的情况下，也可以通过连锁切机的形式来提高电力系统的稳定性。

连锁切机是指在一回线路发生故障而切除这回线路的同时，连锁切除送电线发电厂的部分发电机。采用连锁切机后，由于故障切除后的系统总阻抗虽较不采用连锁切机时略大，以致于造成功角特性曲线的最大值略小，但是故障切除后原动机的机械功率却因连锁切机而大幅度减小，从而使暂态过程中的减速面积将大为增加，对提高系统的稳定性很有利。

二、电力系统振荡

发电机与系统电源之间或系统两部分电源之间功角 δ 的摆动，称为振荡。电力系统的振荡分为同期振荡与非同期振荡，能够保持同步而稳定运行的振荡称为同期振荡，导致失去同步而不能正常运行的称为非同期振荡。

如图 1-3 所示，电力系统振荡和短路的主要区别是：

(1) 振荡时系统各点电压和电流值均作往复性摆动，而短路时电流、电压值是突变的。此外，振荡时电流、电压值的变化速度较慢，而短路时电流、电压值突然变化量很大。

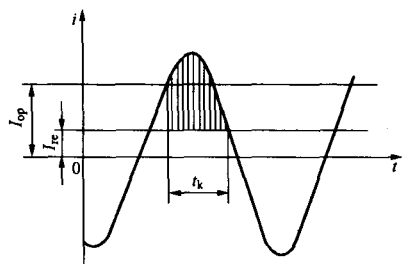


图 1-3 电力系统振荡和短路电流波形图

(2) 振荡时系统任何一点电流与电压之间的相位角都随功角 δ 的变化而改变；而短路时电流与电压之间的角度是基本不变的。

电力系统振荡时，对继电保护装置的电流继电器、阻抗继电器有以下影响：

(1) 对电流继电器的影响。流入继电器的振荡电流随时间变化，当振荡电流达到继电器的动作电流 I_{op} 时，继电器动作；当振荡电流降低到继电器的返回电流 I_{re} 时，继电器返回。如振荡时电流瞬时值超过 I_{op} 的时间大于继电器动作时间（触点闭合的时间），电流速断保护会误动作。一般情况下振荡周期较短，当保护装置的时限大于 $1.5 \sim 2s$ 时，就可能躲过振荡误动作。

(2) 对阻抗继电器的影响。周期性振荡时，电网中任一点的电压和流经线路的电流随两侧电源电动势间相位角的变化而变化。振荡电流增大，电压下降，阻抗继电器可能动作；振荡电流减小，电压升高，阻抗继电器返回。如果阻抗继电器触点闭合的持续时间长，将造成保护装置误动作。

在原理上，不受振荡影响的保护有相差动保护和电流纵差保护等。

三、电力系统接地方式

1. 中性点接地方式

我国电力系统中性点接地方式有三种，即：①中性点直接接地（小阻抗接地）方式；②中性点经消弧线圈接地方式；③中性点不接地方式。

110kV 及以上电网的中性点均采用第一种接地方式。在这种系统中，发生单相接地故障时接地短路电流很大，故称其为大地电流系统。在大地电流系统中发生单相接地故障的概率较高，可占总短路故障的 70% 左右，因此要求其接地保护能灵敏、可靠、快速地切除接地短路故障，以免危及电气设备的安全。

3~35kV 电网的中性点采用第二种或第三种接地方式。在这种系统中，发生单相接地故障时接地短路电流很小，故称其为小接地电流系统。在小接地电流系统中发生单相接地故障时，并不破坏系统线电压的对称性，系统还可继续运行 1~2h，同时由绝缘监察装置发出无选择性信号，由值班人员采取措施加以消除。只有在特殊情况或电网比较复杂、接地电流比较大时，根据技术保安条件，才装设无选择性的接地保护，动作于信号或跳闸。所以，小接地电流系统的接地保护带有很大的特殊性。

中性点直接接地系统（包括经小阻抗接地的系统）发生单相接地故障时，接地短路电流很大，所以这种系统称为大地电流系统。采用中性点不接地或经消弧线圈接地的系统，当某一相发生接地故障时，由于不能构成短路回路，接地故障电流往往比负荷电流小很多，所以这种系统称为小接地电流系统。

大地电流系统与小接地电流系统的划分标准是系统的零序电抗 X_0 与正序电抗 X_1 的数值，我国规定：凡是比值 $X_0/X_1 < 4 \sim 5$ 的系统属于大地电流系统，反之，则属于小接地电流系统。有些国家（如美国与某些西欧国家）规定， $X_0/X_1 > 3.0$ 的系统为小接地电流系统。

2. 接地故障时 $3\dot{I}_0$ 与 $3\dot{U}_0$ 的相位关系

在接地故障时，零序电流与零序电压的相位关系只与变电所和有关支路的零序阻抗角有关，与故障点有无过渡电阻无关。

(1) 正方向接地故障。图 1-4 为正方向接地故障时零序电流与零序电压的相量关系。当 k 点故障时，在零序网络中线路 M 侧流过零序电流 I_{M0} ，则母线 M 侧零序电压 U_{M0} 为

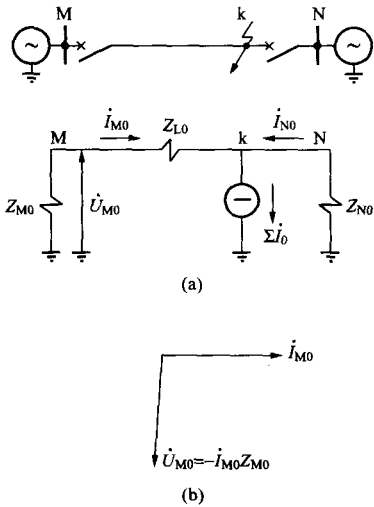


图 1-4 正方向接地故障时零序
电流与零序电压相量关系
(a)零序等值回路；(b)零序电压电流相量图

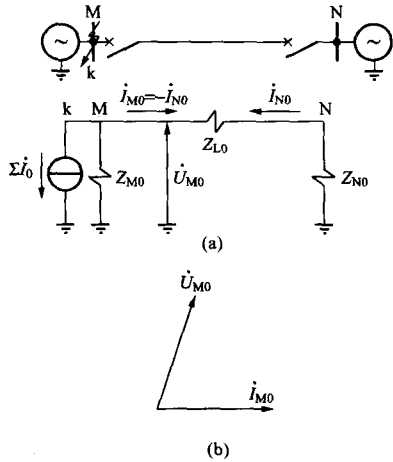


图 1-5 反方向接地故障时零序
电流与零序电压相量关系
(a)零序等值回路；(b)零序电压电流相量图

$$U_{M0} = -I_{M0} \times Z_{M0} \quad (1-4)$$

式中 Z_{M0} ——M 侧零序电源阻抗。

Z_{M0} 主要决定于变电所中性点接地变压器的零序阻抗，所以阻抗角约在 85° 以上。零序电压与电流相量关系如图 1-4 (b) 所示，零序电压滞后零序电流约 95° 。

(2) 反方向接地故障。图 1-5 为反方向接地故障时零序电流与零序电压的相量关系。当 k 点故障时，M 侧保护的零序电流为对侧所供电流，即

$$I_{M0} = -I_{N0} \quad (1-5)$$

如果线路上没有插入任何感应零序电压，则 M 侧母线零序电压为

$$\begin{aligned} \dot{U}_{M0} &= -\dot{I}_{N0}(Z_{N0} + Z_{L0}) \\ &= \dot{I}_{M0}(Z_{N0} + Z_{L0}) \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中 Z_{N0} ——对侧变电所的零序电源阻抗；
 Z_{L0} ——线路零序阻抗。

由于 $Z_{N0} + Z_{L0}$ 主要决定于线路阻抗，所以其阻抗角约在 80° 左右。零序电流与零序电压相量关系如图 1-5 (b) 所示，零序电压超前零序电流 80° 左右。

3. 大接地电流系统

当大接地电流系统接地短路时，电压、电流、功率的分布特点如图 1-6 所示。在大接地电流系统接地短路时，零序电流、零序电压和零序功率的分布与正序分量、负序分量的分布有显著

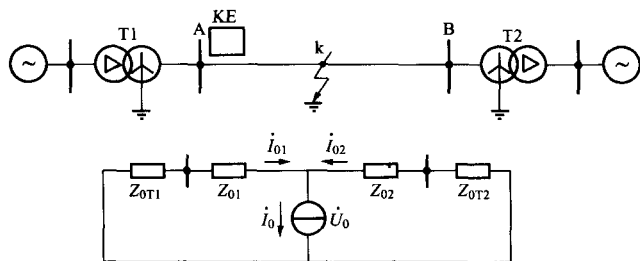


图 1-6 系统接地短路时的零序等效网络

的区别，其主要特点如下：

(1) 当系统任一点单相及两相接地短路时，网络中任何处的 3 倍零序电压（或电流）都等于该处三相电压（或电流）的相量和，即

$$3\dot{U}_0 = \dot{U}_U + \dot{U}_V + \dot{U}_W$$

$$\text{或 } 3\dot{I}_0 = \dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W$$

(2) 系统零序电流的分布与中性点接地的多少及位置有关。图 1-6

为系统接地短路时的零序等效网络。当发生单相接地短路时有

$$I_0 = E_\Sigma / (Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$$

$$I_{01} = I_0 (Z_{02} + Z_{0T2}) / (Z_{02} + Z_{0T2} + Z_{01} + Z_{0T1}) \quad (1-7)$$

上两式中 E_Σ ——电源的合成电动势；

Z_{0T1} 、 Z_{0T2} ——变压器 T1、T2 的零序阻抗；

Z_{01} 、 Z_{02} ——短路点两侧线路的零序阻抗。

当发电厂 A 的变压器中性点接地点增多时， Z_{0T1} 将减小，从而使 I_0 和 I_{01} 增大， I_{02} 减小；反之，则 I_0 和 I_{01} 将减小， I_{02} 增大。如发电厂 B 的变压器中性点不接地，则 Z_{0T2} 为无穷大，也增大且等于 I_0 。当发生两相接地短路时，也可得到同样的结论。

(3) 故障点的零序电压 U_0 最高，变压器中性点接地处的电压为 0。保护安装处电压 $U_{0A} = -I_{01} \times Z_{0T1}$ ， $\dot{I}_0$ 超前于 $\dot{U}_{0A}$ 的相角约等于 95° 。

(4) 零序功率 $S_0 = I_0 \times U_0$ 。由于故障点电压 U_0 最高，所以故障点的 S_0 也最大。愈靠近变压器中性点接地处， S_0 愈小。在故障线路上， S_0 是由线路流向母线。

4. 小接地电流系统

(1) 在小接地电流系统中，当单相（如 U 相）接地时，接地相的对地电容 C_0 被短路，此时电流分布图与相量图如图 1-7 所示。

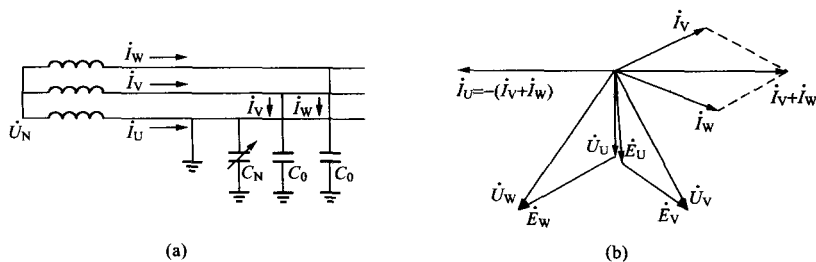


图 1-7 小接地电流系统单相（如 U 相）接地时电流分布图与相量图

(a) 电流分布图；(b) 相量图

可见，中性点电压 U_N 上升为相电压 $(-E_U)$ ，U 相对地电压降为 0，V、W 两相对地电压分别为故障前的 U_V 和 U_W 相间电压。可见，接地相（U 相）电压幅值为 0，非接地相（V、W 相）电压比正常相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍。其零序电压为

$$U_0 = 1/3 \times (U_U + U_V + U_W) = -E_U = U_N \quad (1-8)$$

保护安装处各相电流（未计及负荷电流）为

$$\begin{aligned}\dot{I}_V &= \dot{U}_V / (-jX_C) \\ \dot{I}_W &= \dot{U}_W / (-jX_C) \\ X_W &= \frac{1}{2\pi f C_0} \\ \dot{I}_U &= -(\dot{I}_V + \dot{I}_W) = (\dot{U}_V + \dot{U}_W) / (-jX_W)\end{aligned}\quad (1-9)$$

其有效值为

$$I_V = I_W = \sqrt{3} U_{ph} \times \omega \times C_0 \quad (1-10)$$

式中 U_{ph} ——相电压。

(2) 非故障线路 $3I_0$ 的大小等于本线路的接地电容电流；故障线路 $3I_0$ 大小等于所有非故障线路的 $3I_0$ 之和，即所有非故障线路的接地电容电流之和。

(3) 非故障线路的零序电流超前零序电压 90° ；故障线路的零序电流滞后零序电压 90° ，故障线路的零序电流与非故障线路的零序电流相位相差 180° 。

(4) 接地故障处的电流大小等于所有线路（包括故障线路和非故障线路）的接地电容电流的总和，并超前电压 90° 。

小接地电流系统单相接地时的特点是故障点电流很小，系统能够承受一段时间，而且三相之间的线电压仍然对称，对负荷的供电没有影响，故一般允许再继续运行 $1 \sim 2h$ ，不必立即跳闸，这也是采用中性点非直接接地运行的主要优点。但在单相接地以后，其他两相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，对电力设备而言是安全隐患。为了防止故障进一步扩大成多点接地短路，应及时发出信号，以便运行人员采取措施予以消除。

如上所述，当发生单相接地故障时，接地点将通过接地线路对应电压等级电网的全部对地电容电流。如果此电容电流相当大，就会在接地点产生间歇性电弧，引起过电压，从而使非故障相对地电压极大增加。在电弧接地过电压的作用下，可能导致绝缘损坏，造成两点或多点的接地短路，扩大事故。为此，我国采取的措施是：当各级电压电网单相接地故障时，如果接地电容电流超过一定数值（35kV 电网为 10A，10kV 电网为 10A，3~6kV 电网为 30A），就应在中性点处装设消弧线圈，其目的是利用消弧线圈的感性电流补偿接地故障时的容性电流，使接地故障电流减少，以致自动熄弧，保证继续供电。在正常运行时，中性点由于三相负荷平衡，其对地电压为零，故消弧线圈不起作用。当发生单相故障时，中性点电压升高为故障前相电压，消弧线圈将产生补偿电容电流的电感电流。

电感电流补偿后，接地点的故障电流为 $\Sigma I_C - I_L$ ，因此可根据其性质将消弧线圈的运行方式分为欠补偿、全补偿和过补偿三种。

(1) 欠补偿。补偿后 $\Sigma I_C - I_L > 0$ ，即消弧线圈的感抗 ωL 大于线路容抗 $1/3\omega C_0$ ，电网以欠补偿的方式运行，接地点仍流过容性电流。

(2) 过补偿。补偿后 $\Sigma I_C - I_L < 0$ ，即消弧线圈的感抗 ωL 小于线路容抗 $1/3\omega C_0$ ，电网以过补偿的方式运行，接地点流过感性电流。

(3) 全补偿。补偿后 $\Sigma I_C - I_L = 0$ ，即消弧线圈的感抗 ωL 正好等于线路容抗 $1/3\omega C_0$ 。

那么，哪种补偿方式比较合理呢？从表面上看，全补偿是最理想的状况，只有少许由于电压抬高带来的无功功率转移以及消弧线圈本身有功损耗。但是在全补偿时，系统处于全部线路并联等效电容与消弧线圈谐振回路内，无论不对称电压的大小如何，都将使消弧线圈感受到很高的电