

电气工程学科研究生规划教材

超高压输电线路 继电保护原理

CHAOGAOYA SHUDIAN XIANLU JIDIAN BAOHU YUANLI

范春菊 邵能灵 胡 炎 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电气工程学科研究

超高压输电线路 继电保护原理

范春菊 邵能灵 胡 炎 编著
张艳霞 主审



中国电力出版社

内 容 提 要

本书涵盖当前最新继电保护技术,并结合了超高压输电线路的传统保护(距离保护)和课题组的科研成果,其中包括超高压输电线路的发展,如同杆多回线技术,特高压输电线路技术等研究结果。教材内容新颖,具有较高的科技含量。为提高研究生教学质量、培养研究生创新思维特编写此教材。

本书共分十章,分别介绍了超高压输电线路的故障分析;超高压输电线路继电保护的特殊问题;超高压输电线路继电保护整定计算分析;距离保护;电压矢量图法;双侧电源输电线路距离保护动作行为分析;距离保护的振荡闭锁;故障分量阻抗继电器;超高压输电线路的纵联保护;坚强的智能电网技术。

本书为电气工程学科研究生规划教材,也可作为相关专业参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

超高压输电线路继电保护原理/范春菊,邵能灵,胡炎编著. —北京:中国电力出版社,2015.9

电气工程学科研究生规划教材

ISBN 978-7-5123-5319-7

I. ①超… II. ①范…②邵…③胡… III. ①超高压输电线路—继电保护—研究生—教材 IV. ①TM773

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第103929号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年9月第一版 2015年9月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13印张 313千字

定价 26.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

随着电力系统规模的日益扩大,电网安全运行的要求不断提高,继电保护作为保障电力系统安全运行的重要手段,成为电力系统中不可或缺的重要组成部分。随着电子技术、通信技术和计算机技术的发展,继电保护进入数字化、网络化阶段。为顺应电力系统继电保护的发展和高等院校课程改革的需要,编者特编写此书。

本书是在教学、科研、实践的基础上,为适应 21 世纪教学改革的需要而编写的。全书集继电保护原理和微机继电保护新技术为一体,将传统继电保护和微机保护有机地结合在一起,以高压电网为主线,根据高压电网的各种故障和不正常运行状态,对超高压输电线路继电保护存在的特殊问题进行了较系统的理论分析。

本书在编写过程中力求全面系统地将理论基础、成熟技术和新成果一一介绍给读者,同时在结构编排上尽量考虑各个章节的独立性,以方便各专业根据不同的教学计划灵活选用。本书共十章,第一章讲述电力系统不对称故障的计算方法,第二章讲述超高压输电线路继电保护的 12 个特殊问题,第三章讲述超高压输电线路继电保护整定计算的一些特殊问题,第四章讲述距离保护中各种继电器的相关知识,第五章讲述电压矢量图的绘制方法及其应用,第六章讲述双侧电源输电线路上的距离保护动作行为,第七章讲述振荡闭锁的相关知识,第八章讲述故障分量继电器的相关知识,第九章讲述超高压输电线路的纵联保护,第十章讲述智能电网的相关知识。

本书内容丰富,章节结构紧凑,叙述简明扼要,实用性强。本书可供高等院校电气工程及其相关专业的本科生、研究生作为教材使用,也可供电力工业的工程技术人员参考。

本书由范春菊、郇能灵、胡炎共同编写,天津大学张艳霞教授主审。在编写过程中得到了上海交通大学博士杨炼、硕士马晓明及陈金熠等同学的支持,在此向他们表示深切的谢意。

鉴于某些原因,书中难免存在纰漏与不足之处,敬请读者提出宝贵意见。

编者

2014 年 3 月

目 录

前言

绪论	1
第一章 电力系统不对称故障的计算	8
第一节 对称分量(0、1、2分量)法	8
第二节 用对称分量法计算简单不对称故障	10
第三节 简单不对称短路或者相断线故障的计算	14
第四节 架空输电线间具有零序互感时的零序等效回路	19
第五节 同杆双回线的六序分量法及其应用	23
第六节 同杆四回线十二序分量法及应用	31
第二章 超高压输电线路继电保护的的特殊问题	44
第一节 超高压线路保护的快速性	45
第二节 继电保护的选择性问题	45
第三节 复故障的保护问题	46
第四节 线路主保护的双重化	47
第五节 单相高阻接地故障的保护问题	48
第六节 距离保护的振荡闭锁	48
第七节 两相运行线路的保护	49
第八节 串联电容补偿线路距离保护的问题	50
第九节 同杆并架双回线的保护问题	50
第十节 短路电流中直流分量对保护的影响问题	51
第十一节 线路保护中瞬时测量技术的应用	51
第十二节 关于动态模拟试验的问题	52
第三章 超高压输电线路继电保护整定计算的的特殊问题	54
第一节 大电流接地系统接地距离保护的整定计算	54
第二节 接地距离保护Ⅱ段的整定计算	61
第三节 上下级保护装置原理不同时定值配合的计算	63
第四章 距离保护	68
第一节 距离继电器	68

第二节	距离继电器的接线	72
第三节	单相式阻抗继电器	73
第四节	补偿电压	80
第五节	实用的方向阻抗继电器	81
第六节	实用电抗继电器	85
第七节	四边形特性距离继电器	89
第八节	多相补偿距离继电器	91
第九节	测距式距离继电器相故障测距	100
第十节	序分量距离继电器	102
第五章	电压矢量图法	106
第一节	概述	106
第二节	电力系统故障前故障点电压的求取	106
第三节	故障点故障后的电压的求取	108
第四节	母线电压的求取	115
第五节	求补偿电压	116
第六节	电压矢量图法在距离保护动作行为分析中的应用	118
第六章	双侧电源输电线路距离保护动作行为的分析	122
第一节	复数平面上圆和直线的反演	122
第二节	双侧电源线路上阻抗继电器动作分析的方法	125
第三节	过渡电阻对相间阻抗继电器的影响	126
第四节	双侧电源线路上振荡与短路同时发生时阻抗继电器的动作行为分析	132
第七章	振荡闭锁	136
第一节	振荡闭锁的基本问题	136
第二节	电力系统振荡	137
第三节	振荡对距离保护的影响	140
第四节	振荡闭锁方法	143
第八章	故障分量继电器	151
第一节	故障分量保护的基本性能	151
第二节	故障分量距离继电器	154
第三节	故障分量电抗继电器	162
第四节	准故障分量电抗继电器	166
第九章	超高压输电线路的纵联保护	169
第一节	纵联保护	169
第二节	闭锁式方向纵联保护	170
第三节	纵联距离保护	174
第四节	输电线路的纵联差动保护	175
第五节	弱馈线保护	181
第六节	分支线路的继电保护	182

第七节 串联电容补偿线路的继电保护.....	184
第十章 智能电网概述.....	188
第一节 电网的发展及面临的挑战.....	188
第二节 智能电网的理念和驱动力.....	191
第三节 智能电网研究现状.....	193
第四节 坚强智能电网.....	195
第五节 智能电网的主要技术.....	198
参考文献.....	200

绪 论

随着我国经济的快速发展,不断增长的电力需求带动了电力事业的迅速发展。对电力需求量较大的是工业比较发达的东部沿海区域,但相对较丰富的煤炭资源和水利资源则分布在西北和西南等工业相对不发达地区。造成了我国能源与负荷分布极不平衡的现象,以辽东半岛、山东半岛、京津冀为主的环渤海经济圈,以上海为中心的长三角经济圈及以广东为中心的珠三角经济圈,构成了我国区域经济发展的主体,同时也是电力负荷的中心,而我国的一次能源则主要分布在经济欠发达的西部地区。资料统计显示,我国西部地区水能资源理论蕴藏量约 5.5 亿 kW,约占全国的 82%,可开发水电资源约 2.7 亿 kW,约占全国的 72%,已探明煤炭资源保有量为 3882 亿 t,约占全国的 39%。因此,若想把能源经济地从较富裕的西部送往能源需求较大的东部,就必须进行长距离输电。

以“全国联网、西电东送、南北互供”为原则的电网建设和联网方针是基于我国的能源与负荷分布的实际情况所确立的。依据这一方针,众多的特大型、远距离输送电项目已陆续展开。“十五”期间,我国已陆续完成三峡输变电工程、华中与华北联网工程、西北与华中联网工程等系列互联工程。其中三峡—华东的输电工程已于 2002 年建成,三峡—万县输电线路于 2002 年投产,建成后实现了华中电网与川渝电网互联,二滩电站和四川电网水电可以通过华中电网转送到华东和广东;210km 的河南新乡—河北邯郸输电线路已于 2003 年建成,实现了华中电网与华北电网的互联;975km 长的三峡—广东 1000kW 输电线路已经投产;西北电网与华中电网、山东电网与华北电网、川渝电网与西北电网的互联均已在 2005 年前陆续完成。同时,为提高整个电网的安全稳定运行水平及经济效益,大电网的主干线路将采用超高压、特高压线路,因此大量的超高压、特高压输电线路被规划和陆续投入运行。

目前为止,大量 500kV 的超高压线路已投入运行,750kV 特高压示范线路已于 2005 年 9 月正式投运;晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压示范工程已于 2010 年 8 月通过国家验收;截止 2015 年,华北、华东和华中区域将形成“三纵三横一环网”的特高压交流骨干网架,国家特高压及跨区电网输送容量将达到 2 亿 kW 以上,约占全国装机容量的 20%。国家电网的目标是截至 2020 年建成以“三华”特高压同步电网为中心,东北特高压电网、西北 750kV 电网为送端,联结各大发电基地,各级电网协调发展的坚强智能电网。超(特)高压输电线路是电力系统的骨干网络,在电网中的地位非常重要,对系统的安全可靠运行起着决定性作用。因此,超(特)高压输电线路的保护动作特性显得尤为重要。快速切除故障是提高电力系统暂态稳定最基本、最有效的措施,也是其他安全措施得以发挥的前提条件。此外,缩短故障切除时间还会带来许多其他有益的效果,如减小电气设备的损坏程度,提高

重合闸成功率,防止事故扩大等。因此,提高超高压输电线路保护的動作速度,不仅能提高大电网互联系统的稳定性,还能带来巨大的经济效益。作为电网安全稳定运行的哨兵,继电保护及安全装置将承担更大的责任,如何进一步提高保护装置的性能,这对继电保护工作者提出了新的任务和要求。

一、超高压线路保护的发展历史与现状

随着电力系统的发展,继电保护技术经历了不断完善的过程。19世纪末开始利用熔断器防止在短路发生时损坏设备,从而建立了过电流保护,20世纪初研制出电流差动保护,1910年出现了方向性电流保护,20年代距离保护已经在输电线路得到使用,1927年开始了快速動作的高频保护的研究。由此可见,到20世纪20年代末,一般的继电保护原理基本上都已建立,迄今在保护原理方面没有出现突破性进展。继电保护装置硬件的发展,从1901年的感应式过电流继电器至今大体经历了机电型、整流型、晶体管型、集成电路型和数字计算机型五个阶段;从机电式到半导体式主要体现在无触点化、小型化、低功耗;从半导体式到微机式则主要体现在数字化和智能化,继电保护技术的微机化为继电保护的发展提供了更为广阔的发展空间。

计算机是继电保护发展历史上的一个重要角色。在微机保护的发展过程中,相关的继电保护研究人员为微机保护的实用化做出了巨大贡献。1965年英国剑桥大学的P. G. McLaren等人率先提出利用采样技术实现输电线路的距离保护。1966年澳大利亚新南威尔士大学的L. F. Morrison预测了输电线路和变电站采用计算机控制的前景,并进一步研究了微机保护的理論,主要是应用于微机继电保护的各種算法。美国西屋公司的G. D. Rockefeller等人在1969年前后开始进行具体装置的研制,20世纪70年代初,成功研制的第一套具有实用意义的微机保护投入电力系统试运行,并于1972年发表了装置的试运行样机的原理、结构和现场运行结果。随着微机型保护在硬件结构和软件技术方面的逐步成熟,该技术在西方一些国家逐步得到推广应用。

中国的微机保护研究工作起步较晚,但发展却比较迅速。1984年华北电力大学杨奇逊教授研制的国内第一套微机距离保护样机在河北马头电厂试运行后,通过鉴定。1986年,杨奇逊教授成功研制国内第一套微机高压线路保护装置,并在系统中获得实际应用,为微机保护的推广开辟了道路,揭开了我国继电保护发展史上新的一页。进入20世纪90年代,硬件水平的迅速提高使得实时、复杂的信号处理成为可能,随着信号处理手段、智能技术的发展,利用DSP提取信号特征及保护功能的综合优化与智能化成为保护发展的中心,保护的构成方式与原理在一定程度上得到了长足发展。

除反映工频电气量的继电保护装置外,随着现代电力系统规模的扩大,为增加整个系统的稳定性,需要動作速度更快的保护。20世纪五六十年代提出了故障暂态分量的保护原理,20世纪70年代末提出了利用系统故障时产生的行波实现超高速動作的行波保护。随后,针对行波保护的不同特点,各种各样的行波保护原理被提出。行波保护最显著的特点是動作速度快,但也存在缺乏故障选相、对系统参数敏感、不能检测电压过零点故障等缺点,因此在实际应用中受到一定限制。

从目前国内外继电保护技术发展来看,计算机化、网络化、保护、控制、测量、数据通信一体化和人工智能化,已经成为继电保护的发展趋势。

二、新型线路保护原理与技术

保护新原理的研究对提高继电保护水平具有根本性的意义。在微机保护形成与发展的历史中,保护的新原理不断涌现,其中具有代表性的是故障分量原理保护,在得到广泛认同的同时取得了良好的运行效果,故障信息及故障特征的提取、处理和利用一直是继电保护技术发展的基础和关键。20世纪30年代以来,在继电保护技术中广泛而成功地应用了故障时出现的负序和零序分量来构成保护装置。20世纪50年代,开展了暂态分量用于保护的研究,开辟了继电保护技术中利用故障信息的新途径。微机保护的出现为识别和获取故障信息创造了前所未有的有利条件,充分利用微机的运算能力、记忆能力、分析能力不断发掘和利用新故障信息,对继电保护技术的进一步发展具有十分重要的意义。

故障分量保护的成功应用促进了继电保护原理的进一步发展。基于故障分量原理的保护主要分为工频故障分量保护和暂态故障分量保护,其中工频故障分量原理是至今最成功的原理之一。反应工频故障分量的保护具有灵敏度高、动作速度快、受过渡电阻影响小且不受负荷分量影响等特点,故障分量距离保护、工频故障分量方向保护被广大用户接受并普遍应用,同时工频故障分量原理被不断推广,如故障分量纵联差动保护等,并相继取得成功、效果显著。

传统的继电保护是建立在工频故障信息基础上的,而实际高压长距离输电线路的分布参数特性很明显,在故障时会产生从非周期、工频到高频等丰富的频率分量。传统保护中多是利用工频分量来获取故障信息和实现保护功能,而将高频分量当作噪声滤掉,事实上故障暂态过程中产生的高频信号中含有更多的故障信息,可用来完成利用工频信号实现不了的新型保护。暂态分量原理保护包括暂态行波保护和利用暂态频率特性保护,后者又称为暂态保护。暂态行波保护是暂态保护的一种,只利用了行波初始波头及后续两三个反射波所包含的故障信息,未完全使用故障产生的暂态量,利用暂态行波进行保护的研究始于20世纪50年代末,并在七八十年代达到顶峰。在此期间,日本学者 T. Takagi 提出了行波差动保护原理 Dommel 和 Michels 提出了行波判别式方向保护原理,Johns 和 Aggarwal 提出了幅值比较式行波保护原理,Chamia 和 Liberman 提出了极性比较式行波保护原理,Crossley 和 McLaren 等人提出了行波距离继电器。早期的行波保护装置因受当时技术条件的限制,很难处理好快速性和可靠性间的矛盾,并没有在电力系统中得到广泛应用。行波保护未能成为具有标志性的新一代保护,其最主要原因是保护原理的可靠性问题,以往的行波保护原理抵御电网非故障情况下的各种扰动的能力不强,要保证行波保护的完全正确动作比较困难。

对于高压和超高压输电线路来说,故障时的高频暂态信号主要由频率分量比较集中的一部分高频信号和频带较宽、能量比较均衡的另一部分低频信号组成。利用暂态频率特性的保护即暂态保护,通过检测故障暂态过程中产生的高频信号来实现其保护功能。目前,利用暂态分量的保护分为有通信保护和无通信保护两种,由于受通信通道性能的限制,目前有通信的暂态保护主要通过通信传递两端的保护动作信息。20世纪90年代,Z. Q. Bo. 和 A. T. Johns 等人用暂态电流信号作为保护的判断量,利用双端信息综合判断以实现方向保护,陆续提出了一系列无通信单端暂态量故障信息提取及测量技术和保护的具体实施方案。

自适应继电保护是20世纪80年代提出的一个较新的研究课题,自适应继电保护可以根据电力系统运行方式和故障状态的变化而实时改变保护性能、特性或定值,这种保护引起了

人们的极大关注。

新技术应用于继电保护,使继电保护这个较老的学科充满了生机和活力,主要体现在全球卫星定位系统(Global Positioning System,简称GPS)的应用,光学电流互感器(Optical Current Transducer,简称OCT)、光学电压互感器(Optical Voltage Transducer,简称OVT)的开发,保护控制测量一体化等方面。

人工智能应用于继电保护的研究始于20世纪90年代,到现在仍然是继电保护研究的一个重要分支,它们体现在模糊逻辑的应用、人工神经网络的应用、专家系统应用等研究方向。在理论研究与创新方面,小波分析、数学分形理论、Kalman滤波、遗传算法、模式识别与信号处理技术的应用研究也正在蓬勃地开展。

三、超高压输电线路继电保护的特点和基本要求

超高压线路的保护和中低压线路保护相比,由于电压等级和线路结构不同,存在一些特殊性。主要表现在以下方面:

(1) 超高压输电线路电压等级较高、输电距离较长,因此必须考虑沿线的分布电容,对超高压输电线路必须采用分布参数进行描述。同时为提高输送容量和保持系统电压的稳定,在一些线路上安装了串补电容和并联电抗器。超高压电网中电感和电阻的比值大、时间常数大,非周期分量和谐波分量衰减缓慢,将对快速保护产生一定影响。因此,在超高压输电线路发生故障后,暂态过程较长、谐波含量较高、成分也很复杂,对保护电气量的精确获取和保护原理提出了更高的要求。

(2) 超高压输电线路要穿越的自然环境较复杂,有可能发生高阻接地故障,保护原理要有足够的能力反映和切除此类故障。

(3) 由于超高压长线路存在比较明显的分布电容电流,保护原理必须对其进行合理地考虑,以提高保护的性能。

(4) 为提高供电的可靠性,超高压输电线路采用单相重合闸方式,因此存在非全相运行状态。保护原理要有足够的可靠性,防止在非全相运行状态下的误动。

(5) 超高压输电线路相间距离较大,绝缘子串较长,发生短路时过渡电阻可能会很大,过渡电阻的存在会影响保护的動作性能。

(6) 高压线路常为重负荷线路,在长距离输电线路末端的短路电流可能低于负荷电流,且使线路两端功角摆开较大,容易诱发系统振荡等。此外,电网中会出现多端线路,对继电保护的動作特性提出了更高的要求。

鉴于上述超高压输电线路继电保护特点,对其提出基本要求如下:

1) 高速。要求能够在超高压线路发生故障后,尽可能地快速切除全线,一般要求保护出口不超过25~30ms。

2) 可靠。要求能够在各种故障类型下都可靠动作,具备较高的带过渡电阻的能力,能够在非全相运行状态下和系统振荡时可靠地动作,保护在转换性故障等情况下不发生误动。

3) 灵敏。无论在何种故障情况下,都能可靠的识别故障类型,并作出反应。

四、国内外超高压输电线路保护配置方案

中国500kV超高压输电线路运行初期,所配置的保护装置型号主要包括瑞士原BBC公

司的 LZ-96 型距离保护装置、瑞典原 ASEA 公司的 RAZFE 型距离保护装置、美国 GE 公司的 SLYP/SLCN 型高频方向保护装置和南京自动化研究所生产的 JJ-500 型多相补偿距离保护装置等。随着光纤技术和微机继电保护技术的发展,超高压保护的配置方案有所变化,如在广东 500kV 电网上配备了两套主保护:一套主保护为电流差动阻抗选相元件,另一套保护为 LZ-96 高频相间及接地距离保护,后备保护装置为独立阶梯式相间及接地距离保护装置和零序反时限电流保护装置。

就 500kV 线路而言,应装备两套独立完整的全线速动数字式保护,并独立组屏。那两套完整主保护的交流电压、交流电流、直流电源、通道设备和跳闸线圈等应互相独立,且每套保护都应该包含能够全线速通的主保护及完整的后备保护。按原理分类可以将线路主保护分为三类,即高频距离保护、方向高频保护和分相电流的差动保护。后备保护的配置原则为①采用近后备;②对相间短路,宜用阶段式距离保护;③对于接地短路,应该设计接地距离保护,且辅以阶段式或者反时限零序的电流保护。

国外 750kV 输电线路已有多年的运行经验,根据系统稳定性要求,超高压系统保护的配置一般有两套主保护和一套后备保护,保护的配置原则为为保证系统稳定,限制线路末端非同步切除引起的开关冲击,主保护的动作时间应小于 20ms,与主保护原理不同的后备保护,应快速切除在其保护区内的故障;除本地的后备保护,还应有接地和相间故障的远后备保护;在故障电流较小情况下也能正确判相。如美国电力公司 765kV 系统的继电保护方案为两套主保护,一套是基于闭锁信号的方向高频保护,另一套是基于容许跳闸信号的高频距离保护;相间保护为两套,一套为晶体管距离保护,构成高频闭锁方向比较保护,另一套为后备保护,基于容许跳闸的电磁型高频距离保护;接地保护也有两套,一套采用接地距离构成基于闭锁信号的高频方向保护,另一套为高频相差保护。

近年来,随着光纤技术的发展和成熟,光纤电流差动保护由于其灵敏度高,能适应电力系统的振荡、非全相等各种复杂的运行方式,动作速度快、可适应任何拓扑结构的复杂电力网络等特点,已成为超高压线路保护中首选主保护。

五、智能电网环境下的输电线路继电保护

智能电网的提出和建设是 21 世纪电力工业的新举创,是世界范围内应对能源环境问题和提升电网运行质量的有力措施。我国智能电网的发展具有如下特征:①发电方面,我国发电装机中以燃煤火电机组占主要比重,一次化石能源供需缺口拉大、环境污染严重的问题正日益突出,需要积极开发风电、太阳能等可再生能源电力,优化能源供应结构、降低节能减排压力;②输电方面,我国能源与负荷呈逆向分布,能源中心和负荷中心之间相距上千公里,需要建设超/特高压跨区域输电网络,实现能源资源的优化配置,提高经济效益;③配用电方面,随着分布式电源接入,配网由单电源模式转变为多电源模式,潮流分布发生了很大变化,智能用电服务的推广增加了电网与用户之间的双向互动,电能消费方式出现了转变。

智能电网的建设影响了我国电力系统发电、输电、配电、用电各环节,给作为电网安全运行第一道防线的继电保护带来了挑战,传统保护存在的诸多不足逐渐暴露。同时智能电网先进的信息系统也为继电保护的发展提供了良好机遇,应该积极利用智能电网以构建更加合理可靠的保护系统,适应电网变革。

1. 大电网、超/特高压对继电保护要求

超/特高压互联大电网是智能电网的重要特征之一,对继电保护产生了一定的影响。

(1) 特高压电网故障时谐波分量较大,非周期分量衰减缓慢,暂态过程明显,影响保护动作的可靠性和快速性。

(2) 电流互感器、电压互感器在暂态状态下的传变特性更差,故障状态转换时容易造成保护误动作。

(3) 超/特高压长线路分布电容对电流差动保护和按集中参数模型构成的保护产生不利影响。

(4) 同塔双回或多回线路的跨线故障及互感和线路参数不平衡会对保护造成影响。

(5) 变压器保护利用谐波含量区分内部故障与励磁涌流的难度增大。

(6) 电网间的相互影响使故障特性更加复杂,故障计算误差增加。

(7) 对继电保护设备要求具有更高的可靠性、安全性和电磁兼容能力。

2. 电力电子设备对故障电流造成影响

智能电网的建设使一次系统中出现了大量电力电子设备,这些设备使电网短路电流的特征和分布发生了质的变化。

(1) 柔性交流输电系统(FACTS)元件的安装位置、投入运行及所涉及参数的调整变化会对电网短路电流的特征和分布产生影响。

(2) 直流输电系统的控制和保护问题仍然很突出,交、直流系统的故障会互相影响。

(3) 风机类型、工作状态、所采用的控制方法、故障类型及风电场的弱电源特征是影响风电接入电力系统故障电流的重要因素,会对不同时段的保护及选相功能产生影响。

3. 继电保护需要和电网的控制策略相协调配合

FACTS元件的大量应用、直流输电工程投入运行及规模化风电场、光伏电站的并网运行,使电网的继电保护必须与这些设备或元件的控制策略进行协调和配合。其中包括FACTS元件的保护与控制及其与系统保护的协调配合,直流输电系统的控制与保护及交直流混联系统保护的协调与配合,风电、光伏电站的并网控制对接入系统保护的影响,此外还包括电网一、二、三道防线之间的协调配合。

4. 网络拓扑和运行方式多变使定值配合式保护失去了生存环境

目前以光纤差动为代表的主保护已趋于完善,然而受电网运行方式和网络拓扑结构影响的传统后备保护却面临很多困难。为保证其可靠性,必须按照最严酷的情况进行配置和整定;为保证其选择性,只能牺牲后备保护的快速性和灵敏性。传统后备保护仅利用本地信息并考虑相互配合来实现后备功能的构成模式,在解决适应网络拓扑和运行方式多变问题方面也很困难,众多大停电事故也表明,传统后备保护由于其本身局限性,对系统崩溃也有一定影响。

传统后备保护的问题具体表现为:①整定配合复杂、动作时间长,可能不满足系统稳定所需切除时间,威胁电网安全;②受系统运行方式影响大,不能跟踪适应运行方式变化,保护的选择性和灵敏性难以兼顾;③不能很好区分区内故障和故障切除后引起的潮流转移过负荷,易造成连锁跳闸。

5. 智能电网建设给继电保护带来机遇

智能电网的发展也为新型继电保护的研究应用提供了平台。在信息采集方面,我国自

1996 年起开始构建实时动态监测系统，截至目前我国所有 500kV 变电站和大部分 220kV 的变电站都安装了同步相量测量单元 (PMU)，广域测量系统 (WAMS) 也已具规模。WAMS/PMU 能够实现广域电网的在线同步测量，数据更新速度可缩短到几十毫秒，可用于实现基于同步信息的继电保护功能。

信息通信方面，目前我国电网 500kV 及以上的光纤覆盖率达到了 100%，220kV 覆盖率为 99.2%，110kV 覆盖率为 93%，形成了以光纤为主要介质，以分层分级自愈环网为主要特征的电力通信专网。基于 IEC 61850 标准的数字化变电站实现了站内一次设备的数字化和二次装置的网络化，全站具有统一标准平台，能够方便地实现信息共享和互操作。

除各种电气量信息外，智能电网的信息平台还将包括局放监测、覆冰监测、雷电监测等多种信息系统。如何将多处、多类型信息用于电网继电保护领域，来克服传统继电保护的存在问题，使保护变得更加“智能”，成为继电保护进一步研究的课题和发展方向。

第一章 电力系统不对称故障的计算

电力系统不对称故障包括不对称短路、断路及串联补偿电容器保护间隙的不对称击穿等。仅在电力系统中某处出现的不对称故障称为简单不对称故障，在不同地点同时发生的不对称故障则称为复杂不对称故障。本章主要讨论不对称故障的计算方法，是分析研究继电保护的動作行为的基础。

在三相对称条件下，故障计算可以按单相进行，但出现不对称故障后，计算必须按照三相进行。为简化计算，通常将 A、B、C 三相电压和电流分解为对称分量（又称 0、1、2 分量）进行计算。本章将着重介绍这种方法，它与继电保护原理有密切联系，此外在一定条件下直接在 A、B、C 三相系统中进行计算也十分方便，对此应作适当介绍。

第一节 对称分量（0、1、2 分量）法

为进行不对称短路计算，通常将 A、B、C 三相电压和电流分解为它们的对称分量。以三相电压为例

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{0A} + \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} \\ \dot{U}_{0B} + \dot{U}_{1B} + \dot{U}_{2B} \\ \dot{U}_{0C} + \dot{U}_{1C} + \dot{U}_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

式中 a ——运算符， $a = e^{j120^\circ}$ 。

上面三行的下标统改为：

$\dot{U}_{0A}$ 、 $\dot{U}_{0B}$ 、 $\dot{U}_{0C}$ ——A、B、C 三相零序分量电压， $\dot{U}_{0A} = \dot{U}_{0B} = \dot{U}_{0C} = \dot{U}_0$ ；

$\dot{U}_{1A}$ 、 $\dot{U}_{1B}$ 、 $\dot{U}_{1C}$ ——A、B、C 三相正序分量电压， $\dot{U}_{1A} = \dot{U}_1$ ， $\dot{U}_{1B} = a^2 \dot{U}_1$ ， $\dot{U}_{1C} = a \dot{U}_1$ ；

$\dot{U}_{2A}$ 、 $\dot{U}_{2B}$ 、 $\dot{U}_{2C}$ ——A、B、C 三相负序分量电压， $\dot{U}_{2A} = \dot{U}_2$ ， $\dot{U}_{2B} = a^2 \dot{U}_2$ ， $\dot{U}_{2C} = a \dot{U}_2$ 。

通常都把 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_0$ 称为正序、负序及零序电压，实际上它们均为以 A 相为参考的各序电压。

求解各序分量即对式 (1-1) 求解，得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

将式 (1-1) 和式 (1-2) 中电压均换成相应的电流可得到 A、B、C 三相电流和正序、

负序、零序电流间关系。

将 A、B、C 三相系统中的 3 个量分解为 0、1、2 系统中的 3 个分量，反过来将 0、1、2 系统中的 3 个分量合成为 A、B、C 三相系统中的 3 个量，在数学上即为在不同坐标系统中进行线性变换，式 (1-1)、式 (1-2) 的矩阵给出实现此变换的关系。

若用对称分量法进行计算，必须知道元件的各序阻抗。假设 A、B、C 三相对称各相自阻抗为 Z_1 ，各相间互阻抗为 Z_m ，则在 A、B、C 坐标系统中有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_1 & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

将式 (1-1) 中的电压改为电流并代入式 (1-3)，再代入式 (1-2)，则得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 + 2Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 + 2Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

式中 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 ——0、1、2 坐标系统中的零序、正序及负序阻抗。

显然， Z_0 、 Z_1 、 Z_2 和 A、B、C 坐标系统中的自阻抗和互阻抗的关系为

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + 2Z_m \\ Z_1 - Z_m \\ Z_1 - Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

A、B、C 坐标系统中的自阻抗和互阻抗也可由各序阻抗表示，因为 $Z_1 = Z_2$ ，故

$$\begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_m \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + 2Z_1 \\ Z_0 - Z_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

由此可见，电力系统中任何元件只要在 A、B、C 坐标系中各相自阻抗相等、各相间互阻抗相等情况下，在 0、1、2 坐标系统中必然有 $Z_1 = Z_2 \neq Z_0$ 。式 (1-4) 的阻抗矩阵为对角阵，各序分量之间的互阻抗为零，各序分量相互独立。即在对称三相系统上加正序（负序或零序）电压仅产生正序（负序或零序）电流。

架空输电线路和电缆三相对称，有 $Z_1 = Z_2 \neq Z_0$ 。电抗器（3 个单相的）和电容器三相对称而且各相之间没有互感（ $Z_m = 0$ ），则有 $Z_1 = Z_2 = Z_0$ 。

变压器也有 $Z_1 = Z_2$ ，但它在网络中呈现的零序阻抗与其接线方式有关。只有当变压器某一侧绕组按星形接线且中性点接地时，零序电流才在该侧流通，在零序等效网络上变压器与其外部系统之间才会连通。当变压器绕组按星形接线但中性点不接地时，零序电流无法在此侧流通，在零序等效网络上变压器与外部系统是断路的。当变压器绕组按三角形接线时，零序电流无法在该侧流通但可在三角形接线的绕组间环流，在零序等效网络上变压器与外部系统之间断路。由三个单相变压器接成的变压器组和三相五柱式变压器的零序励磁阻抗和正序励磁阻抗相等，一般在零序网络中都可认为无限大。三相三柱式变压器的零序磁通只能穿过绝缘介质经变压器的铁壳形成回路，因此零序励磁阻抗小，具体数值与变压器结构有关，一般其标幺值为 0.3~1.0，在零序等效网络中一般不能把三相三柱式变压器的零序励磁阻抗断开。如图 1-1 所示为 YNyn、YNy 和 YNd 三种接线方式变压器的零序等效网络。

发电机为旋转电机，其正序、负序和零序阻抗各不相同，发电机的正序阻抗分为次暂态阻抗、暂态阻抗和同步阻抗。凸极发电机的纵轴线方向的阻抗和横轴线方向的阻抗不相同，在分析快速保护时，正序阻抗采取次暂态电抗 X''_d 。在分析后备保护时则采用同步电抗 X_d ，但应考虑强行励磁作用。由于负序电流所产生的旋转磁场与转子旋转方向相反，且发电机转子纵轴线方向和横轴线方向的阻抗不相同，严格来讲负序阻抗与正序阻抗不等且它本身不是常数。在短路电流实用计算中，对于汽轮发电机和有阻尼绕组水轮发电机，一般均采用 $X_2 \approx X''_d$ 。发电机的零序电流所产生的磁通不能穿过转子，零序阻抗和定子漏抗很相近，零序阻抗的数值视定子绕组的型式而异，具有较大的变动范围，如 $X_0 = (0.15 \sim 0.6) X''_d$ 。

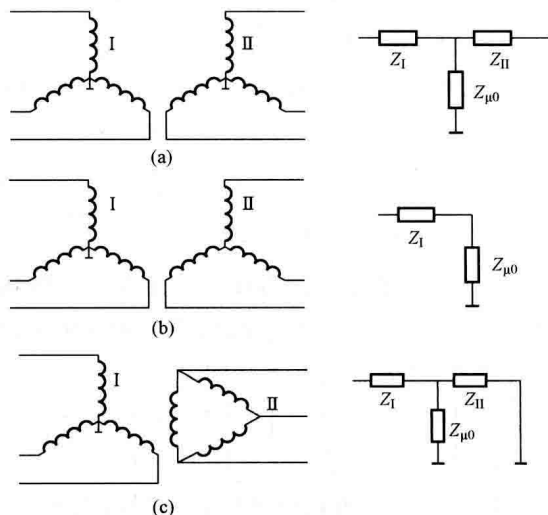


图 1-1 变压器的接线及其零序等效网络图

(a) YNyn 接线；(b) YNy 接线；(c) YNd 接线

电动机的转子是完全对称的，所以无需将其电抗分解为纵轴线与横轴线两个分量。短路后若电动机的端电压下降到很低，则初期电动机可以视为欠励磁的发电机，作为电源向外供给电压。其正序电抗 X_1 ，即次暂态电抗，可用电动机启动电流标幺值的倒数来计算，对于不同型式和功率的电动机，正序电抗的标幺值为 $0.1 \sim 0.35$ 。严格来讲，电动机的负序电抗与正序电抗不同，差别不大，实际计算中都认为和正序电抗相等。在分析后备保护时，电动机的正序电抗应为同步电抗，正序和负序电抗不再相等。

在实用近似计算中，一般将各种负荷用一个综合负荷阻抗代替，以负荷的功率和平均额定电压为基准。综合负荷的正序阻抗的标幺值取 1.1 ，负序阻抗的标幺值取 0.35 。

虽然发电机和负荷的正序和负序阻抗不相等，但在对继电保护的行为进行分析时，一般总认为 $Z_1 = Z_2$ 。

第二节 用对称分量法计算简单不对称故障

简单不对称故障的计算任务首先为求出故障处的三相电压和电流，即共 6 个未知数，用对称分量法进行计算则应求出故障处的各序电压和电流，仍为 6 个未知数。计算方法为将故障支路（不对称部分）和系统其余部分（对称部分）分别处理，根据故障支路电压和电流的