



第十五届 保护和控制学术研讨会 论文集

DI SHIWU JIE
BAOHU HE KONGZHI XUESHU YANTAOHUI
LUNWENJI

中国电机工程学会继电保护专业委员会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



第十五届 保护和控制学术研讨会 论文集

中国电机工程学会继电保护专业委员会 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是第十五届全国保护和控制学术研讨会论文集，收录了来自高等院校、科研院所及制造企业、电力运行企业等单位的 93 篇论文。这些论文反映了电力系统保护和控制领域热点问题及最新研究成果，内容涉及继电保护、电网安全稳定控制、变电站自动化、高压直流输电及电力电子设备控制、分布式发电并网和接入等。论文集内容丰富、实用性强，对电力系统保护和控制技术研究有较高参考价值和借鉴意义，可供相关学者、专家以及工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

第十五届保护和控制学术研讨会论文集 / 中国电机工程学会继电保护专业委员会编. — 北京：中国水利水电出版社，2015. 12
ISBN 978-7-5170-3864-1

I. ①第… II. ①中… III. ①电力系统—继电保护—学术会议—文集②电力系统—自动控制装置—学术会议—文集 IV. ①TM77-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第283770号

书 名	第十五届保护和控制学术研讨会论文集
作 者	中国电机工程学会继电保护专业委员会 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	210mm×297mm 16 开本 30. 25 印张 1046 千字
版 次	2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷
定 价	188. 00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

保护和控制在保障电力系统安全运行的重要基石。智能电网的发展，能源互联网的提出，使得保护和控制在面临新的挑战。可再生能源利用比例不断增大，主动配电网出现，对供电可靠性和经济性的要求日益提高，要求更加精准的保护和控制，更多的配合和协调；柔性交直流输电的应用，改进了电网互联，交直流混联电网的发展，增强了输电能力，电网可控性增强，随之也带来了交直流电网的相互影响，要求协调控制等变化。相关专业的技术、技术进步的相互融合，促进电力系统运行和控制进步，为保护和控制在发展提供了新思路，也给工程实践、新产品实际应用带来新的问题。

保护和控制在领域广大科技人员针对新问题不断进行深入研究和技术拓展，开展了大量试验验证和工程实践工作，取得了丰硕成果，积累了丰富经验和体会。为此，中国电机工程学会继电保护专业委员会主办 2015 年第十五届全国保护和控制在学术研讨会，为业内学者和技术人员搭建学术研讨和经验交流平台，重点从继电保护、电网安全稳定控制、变电站自动化、柔性交直流输电及高压直流输电、新能源接入等方面，进行充分研讨和交流，以推动保护和控制在技术不断发展，更好地保障电力系统安全稳定可靠运行。

本次研讨会的论文征集工作得到了保护和控制在及相关专业领域技术人员的积极响应，以及科研、制造和运行等单位的大力支持。论文征集历经 9 个月，专委会秘书处共收到论文 116 篇。本着学术水平和实用性并重的原则，论文经专家认真、严格的评选后，最终录用 93 篇，并由专委会汇编成集。该论文集在一定程度上反映了国内保护和控制在技术等方面近两年取得的进展和新成果，较好地总结了实践中的先进经验。

值此会议召开及论文集出版之际，我们向在多方面给予中国电机工程学会继电保护专业委员会支持和帮助的单位和个人表示衷心的感谢，希望大家一如既往地关注、支持继电保护领域的学术工作，共同为推动本领域技术进步贡献力量。

中国电机工程学会继电保护专业委员会

二〇一五年十二月

目 录

前言

一、继 电 保 护

继电保护的柔性动作特性	柳焕章, 王德林, 周泽昕 (3)
层次化的广域保护研究	王慧芳, 陈梦晓, 沈绍斐, 何奔腾 (8)
层次化保护系统研究综述	彭放, 高厚磊 (13)
分布式区域保护控制系统研究及应用	李继晟, 杨卉卉, 袁海涛, 张华年 (18)
面向变电站的广域距离保护系统	戴光武, 徐晓春, 谢华, 李园园, 刘革明, 赵青春, 朱晓彤 (23)
智能变电站站域保护控制装置的研究与实现	李志坚, 潘书燕, 王寅丞, 甘云华, 戴欣欣 (27)
智能变电站继电保护相关技术发展综述	陈实, 陈福锋, 张尧 (33)
基于信息交互的智能变电站继电保护优化策略探讨	张尧, 陈福锋, 陈实 (45)
自适应线路差动保护研究	刘凯, 李幼仪, 伊沃布林西奇, 施展鹏, 王建平 (51)
从保护拒动事故谈超高压线路后备保护整定原则的改进	张健康, 粟小华 (56)
风电送出线路距离保护改进方案研究	倪传坤, 文明浩, 潘武略, 袁愉涛 (62)
基于 IP 通信网络的线路电流差动保护性能的研究	杨立璠, 黄顺凯, 朱国强, 魏嫔, 徐礼葆 (67)
防串补线路拒动误动的方案研究	赵剑松, 陈继瑞, 郝慧珍, 董新涛, 唐艳梅 (71)
基于多变量多尺度熵的励磁涌流识别方法	李春艳, 周念成, 王强钢, 熊小伏 (75)
和应涌流动模试验及其识别方法研究	戚宣威, 曹文斌, 尹项根, 张哲, 杨凡 (80)
智能变电站变压器保护就地化实现方案	程天保, 倪传坤, 邓茂军 (88)
线路雷击引起 500kV 主变纵差保护误动的分析	蒋琛, 杨宏宇, 喻建, 叶渊灵 (93)
750kV 主变跳闸故障分析	贺元康, 刘娟楠, 赵鑫 (97)
1000kV 特高压调压补偿变压器结构及涌流特性的研究	陈继瑞, 邓茂军, 倪传坤 (100)
一起复杂的 220kV 变压器故障分析	刘小宝, 潘书燕 (104)
水电站主变差动保护配置方式探讨	刘刚, 陈佳胜 (108)
10kV 配网单相接地引起主变差动保护动作的思考	柯时军 (112)
一起旋转电机引起 110kV 变压器中性点间隙击穿的故障分析	孙东杰, 陈燕, 马海薇, 姜正驰, 汤大海, 施伟成 (115)
发电机定子接地故障分析及定位	席康庆, 李华忠, 郭自刚, 王光, 陈俊, 张琦雪 (121)
计及绕组分布参数的大型发电机定子单相接地故障的定位方法	李金辉, 尹项根, 鲁功强, 杨雯, 徐彪, 简程 (124)
发电机定子接地保护动作原因分析及启示	郭自刚, 季遥遥, 陈俊, 陈佳胜, 王光 (129)
微机磁控型可控并联电抗器保护的研制	李树峰, 苏毅, 张玲华, 邹东霞, 聂娟红 (133)
国华宁东电厂母差保护的改造	冯宝华, 吴利军 (137)
热过负荷保护在 SVC 工程电抗器保护中的应用实例及分析	刘晓强 (139)
基于挡位跟踪的调压变差动保护	胡兵, 郭晓, 韩行军, 行武, 陈福锋, 钟建荣 (142)
110kV 线路故障引起站用电系统失压的原因分析	谢占魁, 毛雅琪 (147)
配电线路变电站出口保护配置与整定	张良, 徐丙垠, 咸日常, 孙学峰, 张海台 (149)
基于 HSR 光纤环网通信的弧光保护系统	李玉平, 张玮, 杨东, 陈庆旭 (154)
配电网单相断线故障线电压分析及定位仿真	王成楷, 洪志章, 苏志龙, 李广平, 梁哲明 (158)

二、稳 定 控 制

交直流混联电网稳定控制系统研究	白杨, 任祖怡, 夏尚学, 徐柯, 何强 (167)
-----------------------	----------------------------

陕北电网安全稳定控制系统的研究和应用 ... 夏尚学, 钱乙卫, 常东旭, 白杨, 任祖怡, 高楠, 王鹏翔 (171)

昌都与四川联网工程安全稳定控制决策模式研究 罗彬, 刘汉伟, 梅涛 (175)

一种适用于非全相再故障时的振荡闭锁开放方法 薛明军, 魏曜, 陈福锋 (179)

特高压直流配套安全稳定控制系统标准化设计方案研究 李德胜 (184)

基于 RTDS 的稳定控制远程测试试验系统研究 徐柯, 白杨, 任祖怡, 王良, 夏尚学 (190)

SDH 光纤通道切换对稳定控制系统影响的分析及测试 王菊隆, 刘龙, 潘中中, 夏海峰 (195)

汽轮发电机组机端次同步阻尼控制技术开发及应用 常富杰, 赵永林, 孙小晶, 马永斌 (200)

复杂接线备自投化简的理论研究与应用 汤大海 (204)

双内桥接线备自投的简化与理论分析 汤大海, 黄永红 (210)

三、变电站自动化

2006 年长岛城电网停电原因分析及对配电网自动化技术发展的启示
..... 康泰峰, 赵凤青, 张瑞鹏, 葛亮, 钟华兵, 李海燕, 王磊, 彭丽媛 (219)

智能变电站数字采样同步方法 赵谦, 钱国明, 陈福锋, 李帅 (224)

智能变电站过程层设备采样可靠性研究 闫志辉, 樊占峰, 李超, 王宏杰 (230)

一种基于积分变换的测频算法研究 陈桂友, 朱何荣, 熊慕文, 刘永钢 (234)

频率跟踪型同步相量测量算法的适用性分析 陈玉林, 王亮, 侯学勇 (238)

自适应频率的改进积分算法研究 石欣, 李宝伟, 董新涛, 赵剑松 (243)

智能变电站 SV 异常处理方法的探讨 邹磊, 陈光华, 薛明军, 姚亮 (246)

一种非同步采样下的滤除直流方法 王霄翔, 程立, 熊慕文 (251)

外积分型电子互感器的数据还原方法研究 尹明, 樊占峰, 闫志辉, 张普 (255)

基于波形识别技术的采样飞点甄别与数据恢复算法 陈琦, 赵谦, 薛明军, 陈琳 (260)

一种带负荷传动断路器及采样异常识别方案的研究 陈继瑞, 张营伟, 邓茂军, 倪传坤 (265)

一种基于柔性光互感器的混合线路故障测距新方案 ... 沈军, 朱晓彤, 赵青春, 刘革民, 赵俊, 张洪喜 (269)

同步相量测量在智能电网保护与控制中的应用 王亮, 李力, 李园园, 陈玉林, 侯学勇, 吕航 (275)

智能变电站故障录波与 PMU 一体化设计与实现 侯学勇, 陈军, 陈玉林, 王亮, 王利平 (280)

智能变电站拓扑错误辨识算法研究 齐文斌, 严耿 (285)

基于自适应时间窗的保护故障信息分析处理方法 李枫, 张军华, 董传燕, 祁忠 (289)

基于多时间断面信息的输电线路瞬时性单相接地故障单端测距改进方法
..... 陆元园, 王宾, 董新洲, 李春晓 (293)

非时钟同步的 T 型输电线路行波测距 梁睿, 王飞, 田野, 王永升, 周瑞 (299)

智能变电站监控系统录波及其诊断分析 邱俊宏, 李宝潭, 张海庭, 郭利军, 卫星 (304)

基于母线 TV 间隔合智一体集成装置研制 朱建斌, 任红旭, 赵应兵, 郑拓夫, 牟涛, 樊占峰 (310)

一种新型海外 RTU 装置的研制 李少卿, 程立, 刘永钢, 熊慕文, 张建华 (316)

四、高压直流输电与电力电子应用

大功率三相 LCL 型光伏并网逆变器数字单环控制系统研究 孙广宇, 李永丽, 靳伟, 王黎绚 (323)

华中电网多直流协调控制系统的研究与应用 夏海峰, 朱磊, 吴海波, 董希建, 李德胜 (329)

基于 VSC - HVDC 的交直流系统距离保护动作特性分析 熊小伏, 肖超, 欧阳金鑫, 郑迪 (336)

南方电网交直流控制保护配合定值研究 田庆, 丁晓兵, 朱韬析, 黄立滨, 李明, 李书勇, 关红兵 (341)

交直流混联电网直流换相失败对交流保护影响研究 姜宪国, 周泽昕, 王兴国, 郭雅蓉 (348)

多回直流换相失败对系统稳定性的影响研究 付俊波, 余江, 俞秋阳 (354)

UPFC 工程实施对线路保护影响分析 谢华, 戴光武, 徐晓春, 赵青春, 潘磊 (358)

分级调节双芯对称型可控移相器阀控策略研究 丁峰峰, 王德昌, 周启文 (363)

一种基于主动控制的 IGBT 并联均流技术 张青杰, 田安民, 梁帅奇 (369)

大容量 SVC 设备在 750kV 沙州变电站的应用 李晓明, 陈炜, 陈赤汉, 王新宝 (373)

基于 MMC 的多端柔直系统功率单元信息监控策略研究 樊道庆, 何晓燕 (379)

五、可再生能源利用

高电压故障下基于串联网侧变换器的 DFIG 风电系统控制策略 曾欣, 姚骏 (385)

兆瓦 (MW) 级海岛微电网自主运行控制方法研究与实践 吕振宁, 毋炳鑫, 田盈, 谢卫华 (393)

光伏电站一体化 AGC 子站装置设计与实现 段胜朋, 王淑超, 侯炜, 王文龙, 陈俊 (400)

含大量 DG 接入的配电网保护新方案 贺敏, 徐光福 (404)

电网单相接地故障对风机机端电压的影响因素分析 王玉婷, 袁嘉玮, 张灏 (409)

基于 AGC 的抽水蓄能机组工况转换补偿控制 刘爱梅, 吴继平, 范斗, 胡帆 (414)

风光储联合发电系统参与 AGC 平抑频率波动的分层控制 戴则梅, 刘爱梅, 滕贤亮, 王君超 (418)

六、其 他

电子式互感器畸变数据集 郑永康, 刘丹, 康小宁, 焦在滨, 刘明忠, 张弛 (427)

基于 ANSYS 电场仿真的电子式电压互感器的设计 颜语, 庄益诗, 刘洋 (435)

数字化 TA 二次检测仪的研制与应用 杨博涛, 陈明 (439)

继电保护装置液晶显示器在线监测技术研究 宋小舟 (444)

智能变电站断路器控制回路设计方案研究 李兴华, 牟长玖, 严牧君 (449)

电力二次屏柜接地铜排实施方案研究 李兴华, 何学东, 杜江波 (453)

集装箱式 SVC 工程穿墙套管的设计 魏旭东, 林天津, 杜江波 (458)

基于矩形窗时域滤波算法的热导检测系统设计与应用 庄益诗, 王伟杰, 王胜辉, 和红伟, 刘畅 (461)

浅谈超高压电网变压器 TA 极性正确接线 谢占魁, 毛雅琪 (467)

电网运行风险评估及实用化工具 何俊峰, 陈睿, 常宝立, 谭伟, 李明 (471)

一、继电保护

继电保护的柔性动作特性

柳焕章¹，王德林²，周泽昕³

(1. 华中电网有限公司，湖北省武汉市 430077；2. 国家电力调度控制中心，北京市 100031；
3. 中国电力科学研究院，北京市 100192)

摘要：传统继电保护的動作特性是繼電特性——不“是”則“非”，是剛性的。然而，實際上電力系統故障時存在很多“似是而非”的物理現象，譬如：變壓器空載充電時的勵磁涌流與匝間短路，外部短路的電流互感器飽和與內部短路；外部短路初始階段的暫態超越與內部短路等。對於這類故障，難以用傳統的繼電特性來描述。為此，我們提出了一個一直存在，却仍未歸納的新概念——繼電保護的柔性動作特性，就是根據保護對象的故障特徵來確定動作特性，此特性特別適用於故障特徵不明確的情況。本文介紹了繼電保護的繼電特性及自適應特性，系統地闡述了繼電保護的柔性動作特性，介紹了“柔化”繼電保護動作特性的方法，並結合典型案例加以說明。最後簡述了具有柔性動作特性的繼電保護——柔性繼電保護的幾種應用前景。

关键词：继电保护；动作特性；继电特性；柔性；刚性

0 引言

传统的模拟式继电保护利用继电器识别和切除电力系统故障^[1]。继电器的动作特性为继电特性，它具有独特的优势：开关性能好，闭合时阻抗小、断开时阻抗大；抗雷击性能强；无噪声；受周围环境温度影响小等^[2]。

数字技术的进步，颠覆了许多传统观念和做法，出现了许多模拟时代想得出而做不到的新技术。继电保护逐渐演化，历经多代，发生了巨大的变化，但时至今日，仍遗留有模拟时代的“基因”。其动作特性仍然具有继电特性——简单的“是”“非”划分，对于一些简单的问题，继电保护的处理原则一直是坚持反对复杂化，因而仍旧沿用继电特性。例如过电流保护，电流大于定值就动作，小于定值乘返回系数就返回；圆特性、四边形特性的距离保护，在动作区内就动作，在动作区外就不动作等。相对复杂的是具有反时限特性的电流保护，它是反映热稳定电流的保护，是时间的函数，相对于定时限电流保护复杂得多，而且反时限特性有多种。

继电保护面临的许多问题，比起电流反时限特性要复杂得多，存在着可靠性与灵敏性、快速性与选择性的矛盾。利用简单的继电特性和稍复杂的反时限特性仍不能很好地解决这类问题和矛盾。近些年，数字式/微机型继电保护的应用，为更好地解决此类问题提供了技术条件和物质基础。因此，我们跳出传统继电器的“继电特性”观念的束缚，充分利用数字式

保护灵活、智能的优势^[2]，提出柔性继电保护的概念，希望能借此更好地解决现有保护的问题，促进保护的原理、动作特性、动作行为更科学、更合理。

1 传统继电保护的刚性

1.1 继电特性

继电器的继电特性就是其输出只处于开或关两个状态中的一个，当输入量达到一定值时，输出量发生突变，从一个状态变为另一个状态。以常开触点为例，如图1所示，设继电器接点S的开、关的状态分别为0和1，初始状态为0。在继电器线圈L回路输入电流I，当I从零增加到某一定值 I_2 时，继电器接点闭合，状态改变并保持为1；直到线圈L中电流减小到 I_1 时，继电器接点打开，状态由1变为0，并保持。

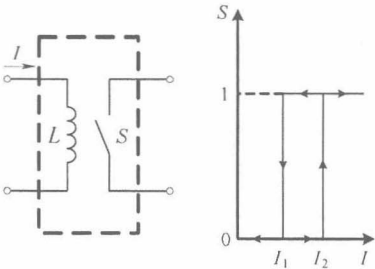


图1 继电特性

继电器这种根据输入量值不同，输出在0和1两个状态之间转换的特性就是继电特性，也是传统继电保护的動作特性。它非常干脆，不“是”則“非”，

是刚性的，适用于解决过流这种简单、明确的问题。

但是电力系统的故障特征一般不是非常明确的，经常会受到不平衡电流、负荷等各种因素的影响，导致刚性的继电特性不能准确识别故障。为此，继电保护的学者和专家们进行了各种探索性研究，提出了继电保护的自适应特性。

1.2 继电保护的自适应特性

继电保护自适应特性的内涵是：根据预定的动作方程，其动作行为随某些因素变化而变化。以变压器差动保护为例，比率制动的差动保护就具有自适应的继电特性^[3]，其比率制动部分的动作量与制动量关系为

$$I_d = KI_r \tag{1}$$

式中： I_d 为动作量； K 为比率； I_r 为制动量。

由式（1）可以看出，动作量 I_d 按照比率 K 随制动量 I_r 的变化而变化，制动量增大、动作量也随之增大，如图 2 所示。

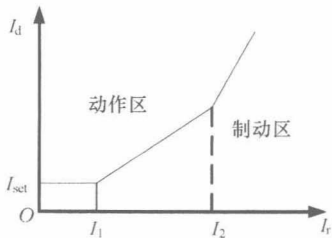


图 2 比率制动特性

自适应特性的一个典型例子是浮动门槛，输入的不平衡增大，动作定值也随之增大，如图 3 所示。

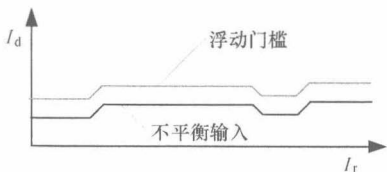
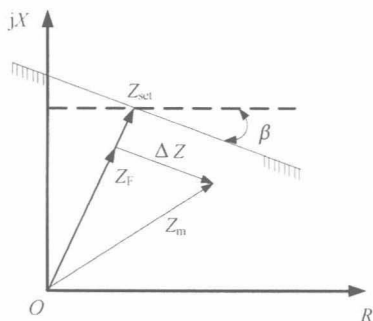


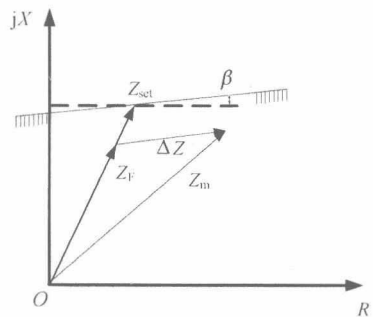
图 3 浮动门槛

另一个自适应特性的经典例子是阻抗保护的零序电抗^[4]，如图 4 所示。零序电抗线与水平线的夹角 β 是变数，会随着过渡电阻产生的附加阻抗的角度变化，也就是电抗线有了一定的自适应能力。

由上述例子可以看到，具有自适应特性的继电器仍然是继电特性，只不过动作的定值，即划分“是”与“非”的界限随条件变化。这一界限一旦定下来，它的动作特性仍然是刚性的。这样，对于某些更复杂的故障，如变压器励磁涌流、系统振荡、TA 饱和等情况下的故障，它们的故障特征趋于模糊，很难找到明确区分故障与非故障的界限，也就无法利用自适应特性处理。对于这种情况，就需要对保护特性进行“柔化”处理，以更准确地判别故障。



(a) 送端



(b) 受端

图 4 阻抗继电器的零序电抗线

2 继电保护的柔性动作特性

2.1 柔性动作特性的概念

继电保护的柔性动作特性完全不同于继电特性和自适应特性，其动作特性根据保护对象的故障特征确定，而不是由简单的“是”与“非”来划分。

继电保护的判据就是找故障与非故障、区内故障与区外故障的差异，若差异鲜明则“刚”，若差异不明确，存在一个混沌区则“柔”。具体来说，对于过流等简单故障，其特征很明确，因而适用于刚性的继电特性；对于存在不平衡电流等复杂情况，可以通过自适应特性调节门槛来躲过不平衡电流；而对于更复杂的难以识别的故障特征情况，无法找到明确的故障与非故障的界限，继电特性不能保证准确识别故障，则需要采用柔性动作特性。

2.2 “柔化”动作特性的方法

一般地，应尽可能获取系统的状态，如果故障特征与非故障特征不存在交集，理论上就能明确区分，就可以直接区分出是故障特征，还是非故障特征，这是刚性的继电特性；然而，当两个特征越来越接近，越来越分不清楚时，就不能简单处理了。将特征不明确区域单独划分出来，称为混沌区。这样由原来界限明确的故障和非故障两个区变成三个区：故障区、非故障区和混沌区。故障区和非故障区就是明确处于故障特征或非故障特征的区域，而在故障特征不明确

的混沌区,需要进行柔化处理,根据具体的故障特征决定其动作特性。



图5 故障特征的区域划分

在处理混沌区之前，我们在寻找、研究主判据时，应尽可能地缩小混沌区，让它鲜明起来，对确实难以区分的混沌区进行“柔化”。

处理混沌区时，首先权衡利弊，针对混沌区制定原则性的指导建议——倾向故障或倾向非故障，或者说，倾向可靠或倾向灵敏，倾向开放或倾向闭锁，倾向误动或倾向拒动。

其次,应考虑付出的代价,包括资源代价、时间代价、程序复杂程度代价及补救措施。

最后，根据技术水平，从根本上、原理上制定技术路线和解决问题的方法。

2.3 柔性动作特性的案例

系统中存在很多混沌的、不明确的故障特征,譬如变压器空充时的励磁涌流与变压器匝间短路^[2]、外部短路的TA饱和与内部短路、系统振荡与短路故障^[2]、外部短路初始阶段的暂态超越与内部短路等。如何处理这些混沌区,将继电特性柔化,这在模拟保护时代非常困难,但对数字式保护就相对容易得多。事实上,数字式保护经过多年的进化,采用的许多技术正在逐步柔化刚性的动作特性。只是还没有提出这样一个概念,并系统地论述。

案例一：以变压器励磁涌流为例。空载充电变压器，变压器差动保护要区分是变压器励磁涌流^[9-10]，还是变压器内部故障。整定导则^[5]给出了15%~20%二次谐波闭锁的指导建议。事实上，这个建议没有起到指导性作用，相反地约束了合理的定值。因为几乎所有的整定都按照15%二次谐波，说明指导性定值定得太高，运行和实验中都出现了不少二次谐波低于15%的涌流。更麻烦的是，系统中不但有二次谐波较小的涌流，还出现了二次谐波较大的故障，这是典型的混沌事件，单靠二次谐波条件判别涌流并不充分。

针对这个混沌事件, 可以做以下柔化处理: 二次谐波低于 5% 直接判定故障; 高于 20% 直接判定为涌流, 如图 6 所示, I_{dq2} 是二次谐波电流, I_{dq} 是基波励磁电流。在 5% ~ 20% 的混沌区, 引入其他量 (如直流量) 参与判断, 增加很多相关性的运算, 二次谐波越大越倾向涌流判断, 反之倾向短路, 等等。以上处理即称为柔化。

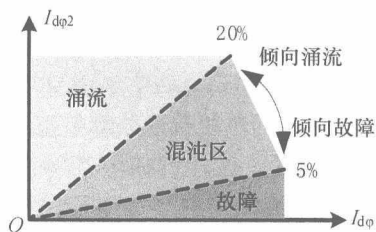


图 6 励磁涌流判别的柔化

案例二：振荡闭锁逻辑中的静稳电流。启动前的负荷电流的大小直接影响振荡闭锁逻辑。当负荷电流大于静稳电流定值直接进入振荡闭锁，小于静稳电流定值经短时开放后进入振荡闭锁^[8]。如此重要、复杂的问题的简单化、刚性化处理很不恰当，用户反映这个定值很难确定，因此，存在很多不恰当、不合理的整定。

这个特性的“柔化”如图7(a)所示,将原来大于或小于定值这两区变为三个区:大于1.5倍定值进入振荡闭锁,小于0.5倍定值短时开放后进入振荡闭锁,在0.5~1.5倍定值之间为混沌区。在混沌区引入电压计算 $U_{\cos\varphi}$,如图7(b)所示^[6],纵轴 t_{KF} 为开放时间,横轴为 $U_{\cos\varphi}$,根据 $U_{\cos\varphi}$ 的大小改变短时开放时间,在功角 φ 接近0°时, $U_{\cos\varphi}$ 接近1倍定值,系统不容易失稳,开放时间延长至160ms;在功角 φ 接近90°时, $U_{\cos\varphi}$ 接近0.7倍定值左右,系统容易失稳,开放时间缩短至30ms,这一改进及大地简化了用户的整定。

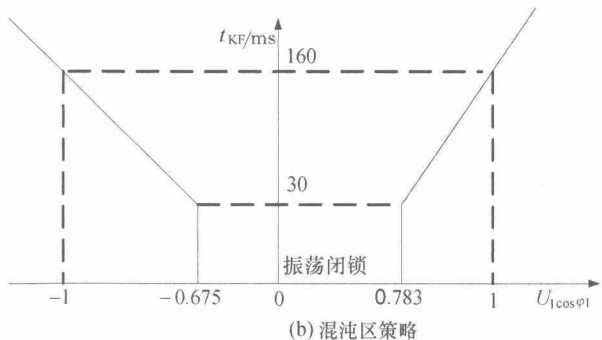
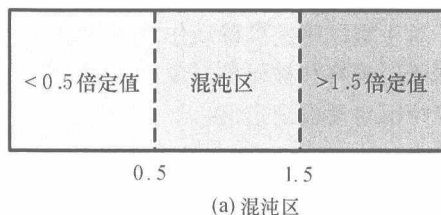


图7 振荡闭锁的柔化

案例三：解决继电保护“快”与“准”之间的矛盾。

先说快，导致正序电压迅速降低的故障必须快速切除。最需要快速切除的是出口三相短路，其次是两相短路接地，而单相接地故障快的要求有所降低^[1]。

所幸的是,需要快速切除的故障,其故障特征十分明显,非常容易快速地检测到故障^[12-14],如通过突变量距离保护切除。

再说准,经高阻的单相接地故障与正常的负荷难以区分,属于混沌区。这样的故障其特征近似于负荷^[15-16],切除时间稍长并不会造成稳定问题,不必过于强调快速动作。此时快速动作的优势微不足道,一是为上一级后备保护提供配合的基础,二是提供重合闸的机会,宜选择求准,将“准”上升为首位,“快”退居到次位。

另外,对于处于动作定值附近的故障,进入严重的混沌区不能轻易动作出口,更为合理的做法是以时间换准确性,使用复杂算法进行反复计算,力求准确;而对于远离动作定值的故障,故障特征十分鲜明,这时应果断地快速动作出口。

可见,时间是重要的资源,在遇到“快”与“准”的矛盾时,进入混沌区。柔化动作时间和处理方式可化解很多矛盾,反时限特性的保护便是一个很好的例子。

3 柔性继电保护的应用前景

(1) 改进现有保护。利用柔性动作特性,对如励磁涌流、振荡、TA饱和等条件下故障特征不明确的情况,进行专门的柔化处理,可以更准确的识别故障,减少误动。

(2) 定值自动整定。根据继电保护柔性动作特性理论,对于难以确定准确动作定值的情况,由保护程序根据既定策略和被保护对象的原始参数、运行参数和故障特征自动设定定值。

4 结语

本文阐述了传统继电保护的继电特性和自适应特性,它们是刚性的,适用于故障特征比较明确的情况。但对于某些难以判断的故障,存在安全与灵敏、快与准的矛盾,为解决此类问题,本文充分利用数字式保护灵活、智能的优势,提出柔性继电保护的概念。将继电保护动作特性柔化,依据保护对象的故障特征确定,并结合几个案例阐述了柔性动作特性的方法。最后简述了柔性继电保护的应用前景。希望这个概念能够得到广泛接受,在标准制定、试验检测、装置开发、运行维护等方面能够形成共识,促进继电保护原理、动作特性、动作行为更科学、更合理。

参考文献

- [1] P M Anderson. 电力系统保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京:

中国电力出版社, 2005.

- [3] 杨奇逊, 黄少锋. 微型机继电保护基础 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 张华中, 王维庆, 朱玲玲, 等. 双回输电线路自适应距离保护 [J]. 电网技术, 2009, 33 (18): 209 - 213.
- [5] DL/T 559—2007 220kV ~ 750kV 电网继电保护装置运行整定规程 [S].
- [6] 杨松伟, 邹晖, 陈水耀, 等. 基于二次谐波比的特高压调压变励磁涌流识别原理 [J]. 电网技术, 2014, 38 (s2): 120 - 125.
- [7] 徐岩, 周霏霏. 基于幅值特征的变压器励磁涌流和故障电流的识别 [J]. 电网技术, 2011, 35 (9): 205 - 209.
- [8] 柳焕章, 周泽昕, 周春霞, 等. 继电保护振荡闭锁的改进措施 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (19): 125 - 133.
- [9] 邵德军, 尹项根, 张哲, 陈卫. 改进型二次谐波励磁涌流制动方法 [J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 84 - 88.
- [10] 王业, 陆于平, 蔡超, 黄涛. 采用自适应数据窗电流的励磁涌流鉴别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (4): 702 - 711.
- [11] 柳焕章, 李银红. 大电流接地系统线路高阻接地距离继电器 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (34): 93 - 98.
- [12] 张旭, 徐振宇, 杨奇逊, 简一. 特高压平行双回线路高阻短路下距离保护算法 [J]. 电网技术, 2015, 39 (1): 182 - 188.
- [13] 姜宪国, 王增平, 张执超, 马静. 基于过渡电阻有功功率的单相高阻接地保护 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (13): 187 - 193.
- [14] 黄少锋, 王兴国. 特高压线路固有频率特征分析及其在继电保护中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (31): 95 - 102.
- [15] 周泽昕, 柳焕章, 王德林, 等. 具备应对过负荷能力的距离保护实施方案 [J]. 电网技术, 2014, 38 (11): 2948 - 2954.
- [16] 柳焕章, 周泽昕, 王德林, 王兴国. 具备应对过负荷能力的距离保护原理 [J]. 电网技术, 2014, 38 (11): 2943 - 2947.

柳焕章 (1954—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统继电保护运行管理、整定计算、继电保护原理。

王德林 (1972—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统交直流继电保护的运行与管理。

周泽昕 (1969—), 女, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 继电保护原理、应用及检测技术。

The Flexible Operating Characteristic of Relay Protections

LIU Huanzhang¹, WANG Delin², ZHOU Zexin³

(1. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430077, China;

2. National Electric Power Dispatch and Control Center, Beijing 100031, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The operating characteristic of traditional relay protections is relay characteristic, which is rigid and either black or white. But in power system, there are lots of specious physical phenomenon, such as inrush current when switching on transformer and inter-turn faults, current transformer saturation under external faults and internal faults, transient overreach at the beginning of short circuit and internal faults, etc. Relay characteristic is not suitable for these kinds of faults. We propose a new and has not been concluded concept, flexible operating characteristic of relay protections, which means the operating characteristic of relay protections rely on the fault feature of its protect object, and is especially suitable for ambiguous fault features. In this paper, the relay characteristic and adaptive characteristic of relay protections are briefly introduced, the flexible operating characteristic of relay protections and its method of flexibility are systematically expatiated and illustrated with examples. Finally, several possible application prospects are proposed.

Key words: relay protection; operating characteristic; relay characteristic; flexibility; rigidity

层次化的广域保护研究

王慧芳, 陈梦晓, 沈绍斐, 何奔腾

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 本文针对电网发展趋势对继电保护的新要求, 提出了层次化结构的广域保护研究思路。首先分析了当前继电保护存在的不足主要集中在后备保护以及原因; 然后根据信息源类型, 分别分析了基于模拟量和状态量的保护算法及其适用条件; 接着对广域保护与就地保护的关系, 以及广域保护的需求进行了分析, 并对就地后备保护简化配置与整定方法、输电线路区域式后备保护、变电站站域式后备保护、广域稳控保护进行了初步分析; 最后阐述了层次化广域保护的设计思路及未来的研究方向。

关键词: 层次化广域保护; 后备保护; 区域保护; 站域保护

0 引言

继电保护是电网安全稳定运行的第一道防线。电网对继电保护动作的要求是满足选择性、灵敏性、速动性和可靠性(简称四性)。上述要求为我国电网安全稳定运行提供了坚强保障。随着电网互联、大型新能源电源的接入, 以及各种智能技术的应用, 电网对继电保护提出了更高要求。例如, 四性的侧重点能根据电网结构和运行方式灵活调节, 三道防线的壁垒能够贯通, 保护对象能从设备扩大到区域或系统, 保护措施能从切除故障元件扩展到与紧急控制策略配合等。由此基于广域信息的广域保护成为当前继电保护与控制领域的研究热点。

目前广域保护研究已有不少成果。大致可以分成以下三类:

(1) 综述类^[1-4], 探讨广域保护的定义、作用、结构、研究现状、存在问题以及发展方向等。

(2) 原理算法类, 主要原理有差动^[5-7]、纵联方向比较^[8,9], 此外还有模式识别^[10]、多智能体技术^[11-13]等。

(3) 应用研究类, 主要有集中式站域保护^[14]、有限区域保护^[15]、广域稳控系统^[16-17]等。

上述研究表明, 广域保护研究正处于百花齐放的自由探索阶段, 方法多样, 成果众多, 在拓宽视野相互促进方面具有积极作用, 但由于概念、模式、功能等理论尚未统一, 使得研究在一定程度上处于无序状态, 不少成果的证明过程复杂, 难以在工程中应用。为此需要对广域保护进行进一步梳理, 为今后更集中有效地展开研究奠定基础。

本文从当前保护系统存在的问题出发, 通过广域保护可能获得的信息源及其特征分析, 探讨不同信息

源可实现的广域保护功能及适用算法, 最后进行了广域保护需求分析, 并给出了层次化的系统结构, 为进一步研究广域保护提供了参考框架。

1 当前继电保护存在的不足与改进方向

以输电网为例, 目前继电保护存在的问题主要有以下方面:

(1) 后备保护动作延时长, 在恶劣条件下可能起不到后备保护作用; 而在发生负荷转移时, 容易误动, 成为电网连锁跳闸事故的推手。

(2) 后备保护整定不仅复杂而且困难, 灵敏性与选择性之间常发生矛盾, 解决措施往往使电网的输电能力下降, 或者制约运行方式的选择。

(3) 电网互联对稳定性提出了更高要求, 而后备保护延时动作前后未能与自动控制装置及时交互, 不仅失去提高系统稳定性的机会, 甚至可能造成稳定性恶化的严重后果。

(4) 采用双重化配置来提高继电保护系统的可靠性, 不仅不经济, 而且在有些情况下, 两套后备保护的误动概率要比单套的概率更大, 从而反而降低系统的可靠性。

由此可见, 继电保护的问题重点集中在后备保护。

后备保护在配置、整定、动作性能、动作后果等方面均存在不足。究其原因, 主要是后备保护只获得被保护元件单端的就地信息, 无法准确识别故障位置, 为此采用多个阶段电气量定值及多个时延的时间定值来判断或排除故障元件, 由此产生了前述不足。因此, 要对后备保护进行改进, 扩大其信息来源是必然的。但信息域的扩大和信息类型的丰富, 将引入信息传输与处理环节, 由此产生数据同步、网络安全、运算速度等问题, 因此只有补充恰当的信息才能在改进后备

保护功能与性能的同时,引入最少量的新问题。

此外,继电保护还存在一些其他问题,例如自动重合闸重合于永久性故障时,对电网造成二次冲击;继电保护动作属于事后补救,未能事前采取措施,避免设备故障损坏等。这些问题将随着相关技术的进步在未来的智能电网中逐步解决。

2 信息源及适用算法分析

2.1 信息源分析

智能变电站的建设与发展给广域保护研究提供了良好数据基础。在智能变电站,不仅能获得所有间隔的电压、电流等模拟量信息,还可以获得就地保护装置的和断路器的状态量信息,理论上还可以获得保护装置的中间处理结果,如阻抗元件启动、方向元件启动等状态量信息。智能变电站之间,可以通过通信网络交换信息,状态量信息交互相对简单,但模拟量信息的交互需要考虑数据同步以及网络阻塞时的延时问题。

此外,智能变电站一次设备的发展方向是智能化,例如,配置有设备状态实时监测装置,能及时评价设备健康状态和运行风险,为设备检修和退役决策提供基础数据。这些数据也可以被继电保护利用,在发生故障前将设备切除,将具有更大的意义。目前设备状态监测数据比较有限,状态评价等技术还不成熟,暂时不进行考虑,但它将成为未来有价值的研究方向之一。

2.2 基于模拟量的保护算法分析及适用条件

基于一定范围内的电压、电流模拟量,目前提出的广域后备保护有基于差动原理^[5-7]、方向比较原理^[8-9]、潮流转移识别原理^[18-19]等。

此类广域保护存在的困难有以下方面:

(1) 保护区域划分及搜索。虽然目前已有一些文献提出了相应的方法,但还缺乏运行经验,实现困难。

(2) 广域信息对通信网络的带宽和可靠性要求极高,在电网发生故障的关键时刻,大量信息传输容易造成网络阻塞,此时失去保护作用危害极大。

(3) 若基于 PMU 构建广域保护,不仅 PMU 的配置问题需要解决,而且经济代价大。

(4) 出现原理上的缺陷(如受 TA 断线,TA 饱和和影响)时将无法实现后备作用。

(5) 广域保护要精确定位故障设备,还需要区域范围内设备主保护动作信息的帮助,因此跳闸决策复杂。

基于模拟量的广域保护也存在一些优势,例如,由于掌握一定区域内模拟量信息,可以与自动控制装置协调,制定出保护跳闸前、后的紧急控制措施,降

低连锁事故的发生概率。

综上,基于模拟量的广域保护不适合作为快速动作的后备保护,但适合与稳控系统协调工作的慢速后备保护。

2.3 基于状态量的保护算法分析及适用条件

状态量一般包括就地保护的动作信息(包括启动元件的中间信息)和断路器的状态信息。信息内容简单,不需要同步,但容易出现传输错误或丢失情况,因此利用状态量信息的广域保护,容错性是必须考虑的关键问题。

利用状态量信息构成的广域保护原理相应较多,名称较难统一,主要有广域方向比较原理^[8-9]、基于图论和矩阵论的广域后备保护算法^[20]、基于判据运算的集合保护^[21],以及通过定义契合因子^[22]、协同因子^[23]、动作因子^[24]等概念而给出的各种广域后备保护方案。

上述保护从算法上可以分为以下两类:

(1) 采用逻辑推理和运算的方法,进行简单的信息融合即可判断出故障元件。该类算法简单可靠,但由于难以枚举不同状态量传输出错或丢失后的信息组合,因此在容错性上有待考验。

(2) 通过定义一些因子,并根据经验建立赋值方法,再采用遗传算法等人工智能方法,计算出具有较高可信度的故障元件。这类算法通常有较好容错性,但是保护动作机理难以解释,运算量相对较大,甚至可能出现不收敛或局部最优解。

综上,基于逻辑运算的广域保护算法由于简单直观,运算速度快,可以优先使用,关键是要研究容错性是否存在漏洞;而需通过人工智能计算的广域保护算法可以在前一类方法容错性不满足时进行补充。

3 广域保护与就地保护的关系及需求分析

3.1 广域保护与就地保护的关系

广域保护不仅需要从就地保护中获取开关量信息,而且广域保护依赖网络,当网络失效时(如蓄意破坏)广域保护也将失效,因此就地保护不仅是广域保护构建的基础,还是广域保护失效时的后备保护。由此可见,就地后备保护必须存在,但其只有在广域保护失效时才有动作机会。

以输电线路为例,当前的就地保护,主保护一般为纵联差动或高频保护,后备保护一般为阶段式的距离保护和零序电流保护(I段为主保护可除外),并常作双重化配置。由于后备保护在配置、整定、动作性能、动作后果等方面均存在不足,因此在有了广域保护后,就地后备保护应做相应简化,在为广域保护提供必要基础信息之外,可以降低对动作性能、动作后果的评价要求,从而简化就地后备保护的配置与整

定。至于如何简化就地后备保护,与广域保护的功能、性能等设计息息相关,因此就地后备保护简化将作为广域保护的研究内容之一。

3.2 广域保护需求分析

因信息源的扩大,广域保护不仅要克服当前就地后备保护存在的不足,还要扩展和改善后备保护的功能与性能,并简化就地后备保护。为此,广域保护需研究以下4方面内容:

1. 就地后备保护简化配置与整定方法

对于输电线路,相间距离保护和接地距离保护定值整定方法相同,区别是阻抗继电器的接线方式不同,分别反映相间故障和接地故障。目前距离保护后备段的整定需要与相邻线路配合,为此需要计算分支系数,整定过程复杂。零序电流保护虽然对接地故障反应灵敏,但整定计算中需要计算零序电流及零序分支系数,比接地距离保护更为复杂。因此,输电线路就地后备保护的配置采用距离保护更为合适,包括相间和接地距离保护。

就地后备保护提供给广域保护的往往是状态量信息,即各段电气量元件的启动信息和方向元件的启动信息。电气量元件的启动信息表明故障位置的大致范围,如Ⅱ段范围内或Ⅲ段范围内;方向元件的启动信息表明故障位置的方向。因此可以按照就地后备保护的作用来简化整定:距离Ⅱ段按保证本线路故障有一定灵敏度整定,即实现近后备功能^[25];距离Ⅲ段按保证相邻线路故障有一定灵敏度整定,实现元后备功能。由于上述方法避免了保护之间的配合,因此整定复杂度大大下降,其又能在广域保护失效时灵敏地切除故障。

对于变压器,也可以进行类似地简化配置与整定,如各侧配置正方向距离保护和反方向距离保护。其中,正方向距离保护做变压器的近后备,以及其他侧母线的远后备,反方向距离保护做本侧母线的近后备和本侧母线所有引出线的远后备。按上述作用可实现按灵敏度要求的定值整定。

简化整定后的就地保护,其定值主要与被保护设备阻抗有关,基本不受运行方式变化的影响,即定值相对固定,因此有条件考虑就地保护装置就地安装,实现一、二次设备的集约放置。

2. 输电线路区域式后备保护

输电线路连接着不同的变电站,其广域后备保护必须从不同变电站获取信息,为此输电线路广域后备保护的构建将以变电站为落脚点,与多个相邻变电站交互(多条线路情况下),即输电线路广域后备保护的信息源具有区域性,因此可称为区域式后备保护^[25]。不同变电站之间通信比站内通信复杂,不仅要考虑站间通信网络的实现模式,还有考虑各变电站

为保证本站信息安全性而设置的网络安全措施对通信的影响。

为实现输电线路后备保护的快速性,采用状态量判据算法较为有利,文献[25]已完成就地距离Ⅱ段保护的简化整定和作为近后备区域式后备保护动作判据的研究,该研究结果表明,区域式后备保护与简化整定后的就地保护配合,能满足电网对近后备保护的四性要求,四性之间没有矛盾,而且判据具有较高容错性。后续还可以对就地距离Ⅲ段保护的整定,以及作为远后备的区域式后备保护判据进行研究,实现远后备保护的四性和谐统一。

由于区域式后备保护的启动是由就地保护触发的,因此负荷转移引起就地保护启动时,站域层保护依据多点信息构成的判据是可以识别出的,进而广域后备保护不会动作,进一步可以闭锁就地后备保护,并与广域层保护交互,采取稳控措施避免连锁事故的发生。

3. 变电站站域式后备保护

变电站内部元件,如变压器、母线、断路器,其各侧信息可以通过本站内部网络获得,因此可以称为站域式后备保护。智能变电站三层网络结构已能满足站域保护的网路需求^[26]。

要实现上述元件的快速后备保护,也适合采用开关量判据算法,分别建立变压器故障、母线故障和断路器失灵故障的后备保护判据,并分析判据的容错性,可以作为一个有意义的研究内容。

与线路区域式后备保护类似,负荷转移不会引起站域式后备保护误动,可以闭锁就地后备保护,与广域层保护交互来消除负荷转移带来的问题。

4. 广域稳控保护

目前的智能变电站已有一些稳控装置,但由于控制范围有限,无法实现优化控制,也难以防止连锁故障的发生。前述的广域保护研究内容,均是以实现快速切除故障元件,缩小停电范围为主要目的的,未能从整体角度考虑与自动控制装置动作相配合提高电网的稳定性。因此,需要研究广域稳控保护^[1,16-17],能根据更广阔地理范围内的信息,在快速保护动作后,判别并制定出合适的控制策略,保证电网安全稳定运行。

由于稳控对象和措施很多,如切机组、切负荷、分散励磁控制、系统解列等,反而导致稳控对象不明确而难以选择措施或措施的组合;稳控措施解决的问题也较复杂,如连锁故障、暂态功角不稳定、频率不稳定、电压不稳定等,再加上不同措施实施的时间尺度有差异,高效的稳控措施制定非常困难。目前已有一些研究,如根据潮流转移量制定实时控制策略以及计及潮流转移的广域保护研究^[18],主要针对的问题