

直流输电线路雷击分析 及保护与测距

束洪春 著



科学出版社

直流输电线路雷击分析及保护与测距

束洪春 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍作者近年来在直流输电线路雷击分析和雷电绕击故障与反击故障的识别、雷电绕击未故障下注入导线雷电流波形的反演恢复原理和方法、现行直流输电线路保护原理及动作特性分析、CSC-HVDC 线路及 VSC-HVDC 线路新型保护与故障测距原理,以及接地极线路故障定位等方面的研究成果。表述力求简练,以阐释方法原理为主线,配有大量仿真实例和效果图,便于读者掌握其要义。

本书可作为高等院校相关学科的研究生、本科生研究直流输电线路雷击电磁暂态分析及保护与测距等问题的参考书,也可供相关科技工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

直流输电线路雷击分析及保护与测距/束洪春著. —北京:科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-047312-7

I. ①直… II. ①束… III. ①直流输电线路-防雷工程-研究 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 026839 号

责任编辑:张海娜 高慧元 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张:21 3/4 插页:6

字数:436 000

定价:138.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

直流输电系统故障约半数为线路故障,线路故障主要是由雷击引起。通常将雷电直击导线致使线路绝缘子闪络称为绕击故障,将雷电直击避雷线档距中央或塔顶而致线路绝缘子闪络称为反击故障。输电线路雷击性质和部位不同,机理和物理过程不同,其线路的雷电防护措施也不同。例如,调整减小保护角以降低绕击率,降低杆塔接地电阻以降低反击率。若能常年对沿输电线路走廊全长的雷电绕击和反击进行观测、辨识和统计分析,对指导既定输电线路防雷、增强其雷电防护措施的针对性,起着基础性作用。此外,雷电波形参数也是研究雷电直击输电线路规律、指导输电线路防雷的重要基础。若能准确获得线路走廊的实测雷电流波形参数,对于增强既定线路雷击跳闸率计算的针对性,分析线路引雷程度,确定线路易受雷击段、易闪段,统计分析线路故障的雷击相关性,均有着极其重要的作用。目前,对于直击输电线路的雷电流参数测量,特别是针对既定特高压直流输电线路完整线路走廊的雷电流参数测量,尚无成熟技术,一定程度上制约着雷击模型的完善、雷电防护措施针对性的增强和新型防雷技术的研发应用。

直流输电线路雷击分析和雷击性质识别着眼于系统一次侧的理论分析和仿真分析。建立特高压直流(UHVDC)输电线路雷击电磁暂态仿真模型:雷电冲击电流源采用受控流源与雷电通道等值波阻抗(300Ω)并联电路,雷电波采用双指数波,电流幅值的取值采用我国现行标准推荐的概率分布;杆塔采用贝杰龙线搭建多波阻抗模型;线路采用 Marti 频变参数模型。绝缘子串闪络模型采用两种闪络判据相结合:①绝缘子串上电压 u_s 与伏秒特性曲线 $u_{sr}(t)$ 相交,即判为闪络,曲线相交点对应时刻定为闪络时刻;②若绝缘子串两端电压 u_s 曲线与伏秒特性曲线 $u_{sr}(t)$ 不相交,电压幅值超过绝缘子串的 50% 放电电压 $U_{50\%}$ 时,也判为闪络。由于正常运行时高压直流(HVDC)输电线路电压恒定,雷击闪络极与雷电流的极性密切相关,雷电放电 75%~90% 为负极性,所以正极绝缘就相对薄弱。对不同大小和极性的雷电直击导线、避雷线档距中央或塔顶致使线路绝缘子闪络或者未致闪络,以及非雷击故障,于 UHVDC 线路全长进行电磁暂态遍历仿真获得对应这些性状的初始电压行波曲线簇,用这些曲线簇对主成分分析(PCA)或主成分分析-支持向量机(PCA-SVM)进行训练,建立了基于极线电压行波 PCA 或 PCA-SVM 聚类的能够区分绕击与反击、雷击线路绝缘子闪络与未闪络、雷击故障与非雷击故障的判别机制、识别方法和模型及算法;提出基于零模电压初始行波波形显含雷电流注入所产生的浪涌和绝缘子闪络所产生浪涌的特征、能够区分绕击与反击故障的

小波模极大值表征和识别方法;探析基于保护安装处获得的暂态电压行波数据,由小波降噪结合 Prony 拟合和最小二乘反卷积技术,对直流输电线路雷电绕击电流波形进行反演恢复的技术路线和方法。

直流功率控制系统具有快速清除故障、恢复供电的功能,具有快速性和灵活性的优势。直流线路故障过程及其动态特性与直流控制作用密切相关,直流控制系统对电气特征量的强制作用,使得直流控制系统对直流线路保护,尤其是对后备保护的影响不容忽视。建立包含控制系统阀控制层的 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电系统仿真模型,以数字仿真试验全面检验和考量 SIEMENS 以电压电流变化率为基础和核心的单端行波保护作为主保护、纵联电流差动保护作为后备保护的直流输电线路保护动作特性和性能;检验和考量 ABB 以极波变化率为核心的主保护性能。数字试验表明,以电压电流变化率为基础和核心的单端行波保护对雷击干扰存在保护误启误判的现实风险、在远端高阻情况下易拒动。而作为高阻故障检测的纵联差动保护是依靠延时来躲过交流系统故障期间暂态响应以保障其不误动,同时,为避免功率调整期间不误动,SIEMENS 差动保护设计中又增加了闭锁逻辑,故此纵差保护出口延时太长,一方面,致使纵差常常起不到后备保护作用;另一方面,致使直流控制系统保护先动作,引起不必要的直流闭锁事故。

以 UHVDC 系统处于全压对称功率正送的运行方式作为研究背景,研究直流输电线路新型保护。研究着眼于:①增强主保护耐受线路远端高阻、雷击干扰、直流输电系统谐波、采样值抖动等影响的能力,以提高主保护性能和可靠性;②加速后备保护响应,加速并可靠闭锁纵联差动保护,以及引入直流线路“方向保护”概念、原理,并以此构建纵联保护;③引入直流线路保护的“辅助元件”概念、原理和算法。

由平波电抗器和直流滤波器构成的直流输电线路实体物理边界,对高频分量具有阻塞作用,使得线路内部故障和外部故障下其量测终端的电压电流高频含量存在显著差异,可借助物理边界电气特性构建直流线路主保护算法,例如,基于线路单端线模电压小波系数能量比、极波电压 S 变换信息熵、极线电压一阶差分平方和及其高频特性、线模电压分形算法、线路模型匹配测后模拟结合相关分析及基于故障极线电压或电流曲线簇进行 PCA 聚类分析的线路内部故障识别元件,以及基于功率正送方式的直接利用电流采样值来构造方向电流和极线电流梯度和的线路故障识别元件。构建了引入电压量的暂态能量方向元件和暂态量方向元件,例如,利用短时窗内的电压突变方向来极化电流的、基于 SOD 变换的、基于短时窗电压电流小波系数相关分析的、基于方向行波积分值比较原理的暂态量方向元件,以及利用线路瞬时功率曲线簇进行 PCA 聚类分析的方向元件。不依赖电压电气量的方向保护有:基于正送方式下有功潮流由整流侧指向逆变侧的规律,构建了利用构造方向电流的方向元件,以及利用线路故障电流曲线簇进行 PCA 聚类分析的方向

元件。借助现有保护通道,由两侧方向元件能够构成直流线路纵联方向保护。仿真验证和分析了基于两侧差流时频特征的直流线路差动保护自适应闭锁判据。

借鉴交流系统保护的成功经验,将启动元件、故障选极元件、雷击干扰识别元件等辅助元件与线路内部故障甄别的主保护分设,独立配置,不失为一种可行的保护方案。直流系统双极运行,当一极故障时,会在另一极感应瞬时电压和电流,因此需要区分故障极,研究故障选极命题。基于 ABB 直流保护极波的概念,提出了基于极波面积比较的故障选极元件,具有绝对选择性。直流线路现有行波保护采样率虽为 6.4kHz,但系短时窗暂态量保护,且以电压、电流变化率和变化量为动作方程,并通过展宽若干采样间隔相继判断,却未配置雷击干扰识别元件,理论仿真和运行实际表明,存在因雷击干扰导致行波保护误判、误启的现实风险。探讨了三种雷击干扰识别元件原理:基于电压行波小波模极大值模值比和相关系数的雷击干扰识辨文件、将电压暂态分量与极电压轴线相关系数与电压采样值直接均值归一化两个特征进行可拓融合的雷击干扰识别元件,以及基于 PCA 聚类分析的雷击干扰识别元件。

直流线路保护的启动、故障选极等辅助元件与其主保护若为统一的表达式,不失为一种极具应用潜力的技术方案。分别有如基于极线电压一阶差分平方和的、构造方向电流的、极线电流梯度和的原理表达式和算法,只需改变其判据整定值和调整判别展宽时间,就可响应高阻故障,实现灵敏启动,准确选出故障极,可靠识别并响应线路内部故障,实现线路主保护功能。在 10kHz 采样率下,基于 PCA 聚类分析的线路故障选极元件和线路内部故障识别及其响应内部故障的主保护,是根据当前故障电气量采样量化值在既有 PCA 聚类空间 PC_1 坐标轴上的投影值 q_1 进行判别,或根据在 PCA 空间聚类中心的欧氏距离进行自适应判断,或根据 PCA-SVM 判别机制和智能算法来实现。且此种基于 PCA 聚类分析的线路保护元件具有较强的适应性和通用性:它与故障瞬时电气量的起始变化方向、陡度和幅值有关,与具体的直流输电系统和线路近乎无关。基于多端柔性直流输电(MTDC)是由三个或三个以上换流站及其连接换流站之间的直流线路组成。分析了在确定的有功潮流方向下,利用 10kHz 采样率的构造方向电流来构建三端电压源换流型高压直流(VSC-HVDC)柔性直流输电线路的“单元保护”。

与交流输电系统不同, HVDC 输电线路其直流母线相连接的平波电抗器和直流滤波器构成了直流输电线路的物理电气边界;直流输电系统只有一回输电线路,直流母线上无其他出线;现实中尚无直流断路器可装备;线路故障不存在故障角问题;线路故障电压行波通常由定位耦合箱予以获取和应用。分析了架空直流输电线路故障测距基于红绿色彩模式图像边缘检测标定的单端电压行波方法和利用电压行波波到相对时差和相对极性的人工神经网络(ANN)测距模型及算法、基于故障电压波形相似度的 k -NN 测距算法、基于离散小波变换-支持向量机(DWT-

SVM)模型的回归算法,以及基于直流线路电压突变能量函数 $\xi_u(k)$ 对高阻故障(HIF)检测标定的双端行波测距方法。探讨了特高压超长线路单端行波远端两端接地(LLG)故障测距从粗测到精测的波速回代校正方法和频差法测距的有效性,以及直流电缆线路单端行波法与频差法故障测距应用。解析了两段线缆混合直流输电线路故障行波规律及单端行波测距方法、基于相对时差和极性的 ANN 测距模型和算法,两段和三段线缆混合直流输电线路故障区段识别的 PCA 聚类分析方法及其单端行波测距、单端测距的 PCA-SVM 回归算法和 k 最近邻(k -NN)分类算法,以及基于双端行波先进行故障区段辨识、再进行行波测距的算法应用解析。同时,探讨了利用故障电流数据进行三端 VSC-HVDC 柔直线路故障测距:基于三端同步电流数据的行波法测距和时域法测距算法、利用单端电流行波数据识别故障支路的 DWT-SVM 算法及单端行波测距、利用相对极性和时差的 ANN 算法,以及 k -NN 算法。诚然,值得关注这样的事实:①由 HVDC 线路电容耦合箱,通过微分运算 Cdu/dt 将一次侧电压行波突变传变为二次侧电流行波突变,而其一次侧电压行波中其他频率成分并未线性传变至二次侧;②目前 HVDC 线路保护用光学互感器,其截止频率通常不超过 10kHz。因此,对于 HVDC 线路测距命题,诸如所谓的行波法、频差法、时域微分方程法、谐波分量阻抗法、 k -NN 算法和 ANN、SVM 回归函数等测距方法,应充分考虑传变设备的带宽和频率特性的影响,还应充分考虑直流控制系统动态响应引起的瞬态响应叠加的影响。

接地极线路不同于直流输电线路,也不同于交流输电线路:①双极平衡运行时,接地极并联的双回引出线路中,流过大小相等、方向相同的直流电流。但因双极触发角和设备参数的差异,接地极线路中会有较小的不平衡电流,一般为额定电流的 1%之内,一般不会超过几百安培;整流侧中性母线运行电压很低,其电压只是入地电流在导线电阻及极址接地极电阻上所引起的压降,与接地极线路长度有关,一般不超过几千伏。②单极运行的时间短,接地极只是在工程初期以及双极投运后某极发生故障或检修时才短时投入单极运行。③极址接地电阻值很小,一般不超过 0.5Ω。因此,由接地极线路故障所引起的故障信号幅值较小,且越靠近极址越小,若应用接地极线路故障本身所引起的故障信号进行测距,势必很难对半线长后的故障进行单端定位。若采用单端行波测距技术,则将面临如何传变如此微弱的故障行波和如何从富含谐波的混杂行波中标定并甄别故障点反射波。可见,借助接地极线路故障本身所产生的行波来实现故障定位的可靠性也无从保证。

提出利用构造方向电流展宽判别算法快速识别接地极线路短路故障、利用采样值求取电压电流的直流分量或利用含直流量频带的小波系数求取直流量来估算极址电阻后,再进行接地极线路故障定位的方案和方法。接地极线路模型分别采用 R-L- π -T 模型和分布参数线路模型,分忽略和计及线间耦合(互参数)模型两种情况,在现场接地极线路故障录波器所采用的 6.4kHz 采样率背景下,剖析了利用

谐波分量的阻抗法和直接利用采样值的最小二乘法及基于波形相似度的 k -NN单端测距算法、利用谐波分量或直流分量的双端法和贝杰龙线路模型的双端时域法测距的精度和可靠性;在 1.0MHz 采样率下,探讨了接地极线路雷击故障行波检测方案和行波测距方法及其可行性。

本书结合作者多年的研究积累,介绍直流输电线路雷击分析和雷电绕击故障与反击故障的识别、雷电绕击未故障下注入导线雷电流波形的反演恢复原理、HVDC 线路新型保护与故障测距以及接地极线路故障定位等命题。结构力求简练,以阐释方法原理为主线,配有大量算例和效果图,便于读者理解掌握其要义。全书内容以作者研究成果为主,吸纳同行研究成果作为补充,以便全书完整,以飨读者。

本书的相关研究得到了国家自然科学基金-云南联合项目(NSFC-YN)“基于数据驱动的高原山地输电线路故障精确定位与雷击电流反演恢复研究”(U1202233)、面上项目“ $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路雷击电流波形反演恢复研究”(50977039)和“ $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电线路保护和故障测距研究”(51267009)的资助,谨致谢忱。

本书旨在为直流输电线路雷击瞬态分析及保护与测距的研究者和相关科技工作者提供参考,由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2016 年 1 月

彩图

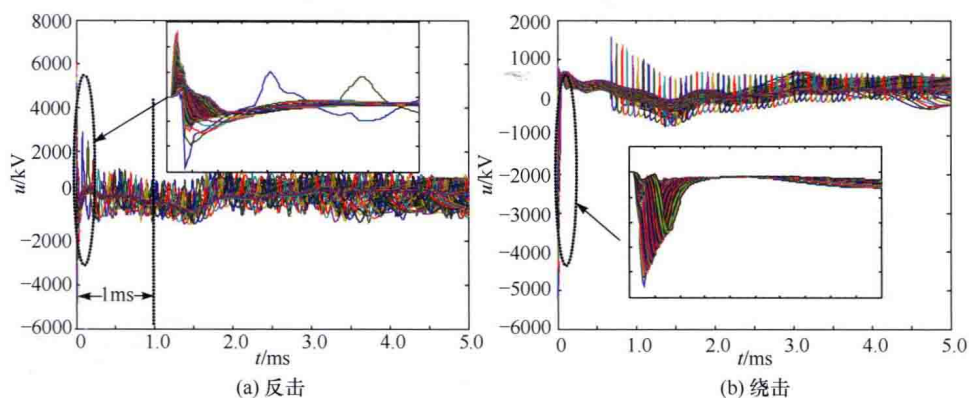


图 1-14 正极线路发生雷击故障下正极线路量测端电压曲线簇

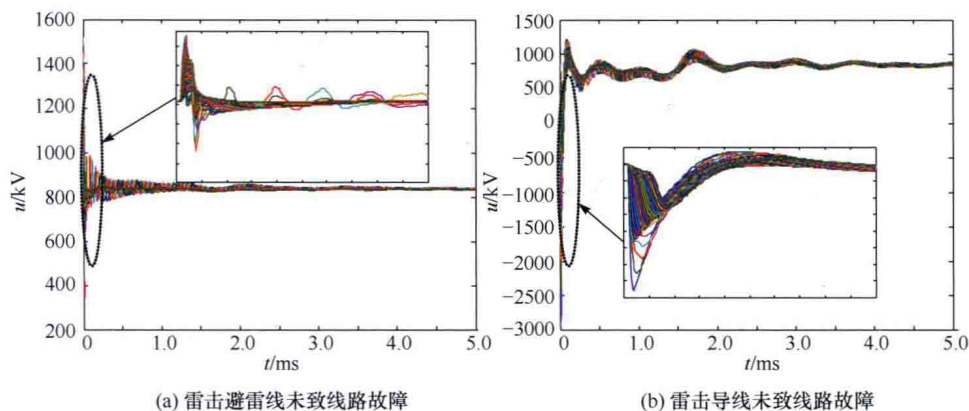


图 1-15 线路遭雷击而未闪络下正极线路量测端电压曲线簇

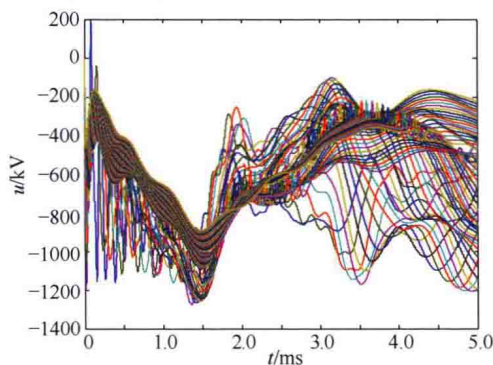


图 1-16 正极线路非雷击性接地故障下正极线路量测端电压曲线簇

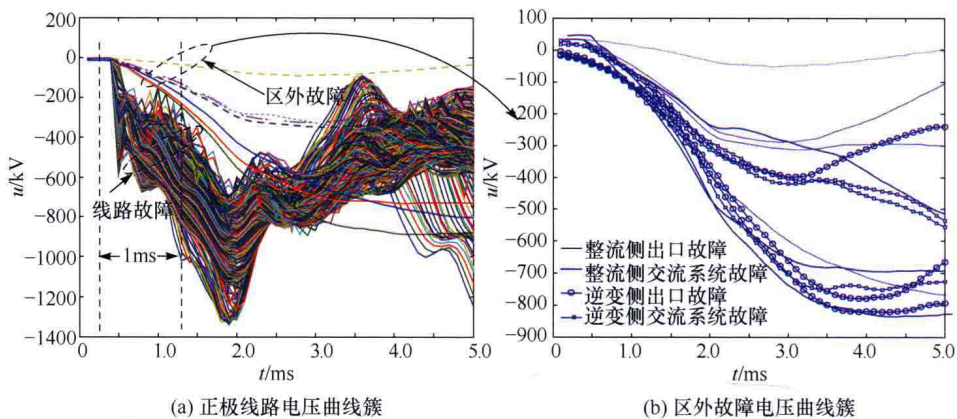


图 3-41 正极线路量测端的故障电压曲线簇

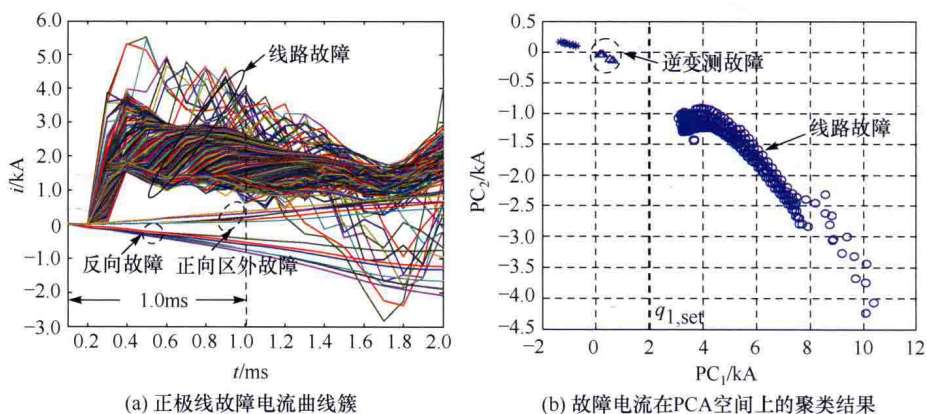


图 3-44 正极线路量测端的电流曲线簇及其在 PCA 空间上的聚类

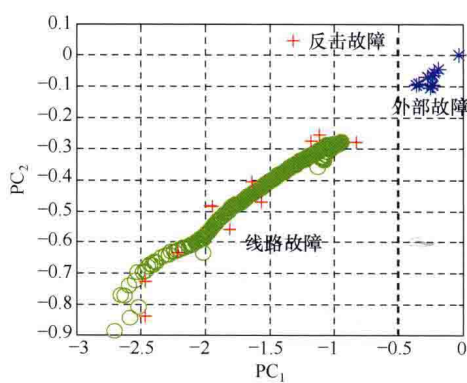


图 3-46 雷电反击故障

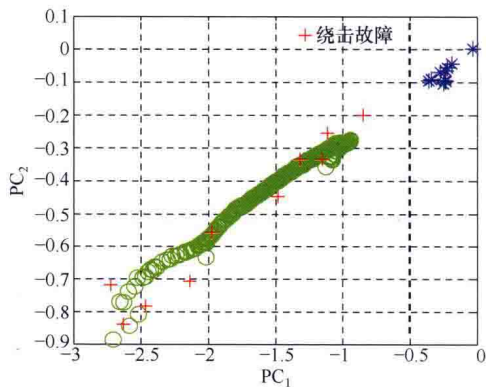


图 3-47 雷电绕击故障

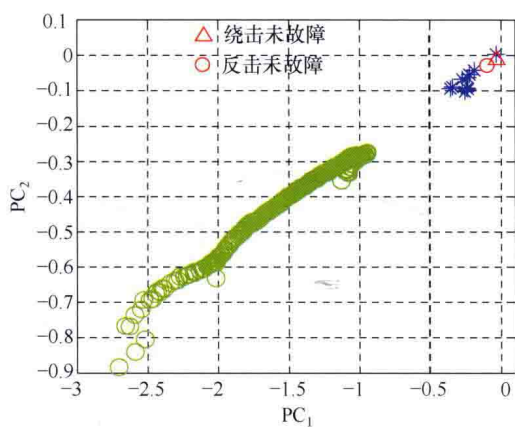


图 3-48 雷击干扰

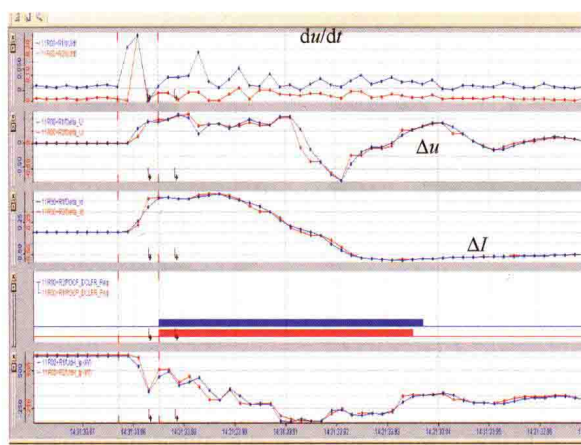


图 3-52 2014 年 3 月 30 日直流线路故障下行波保护结果

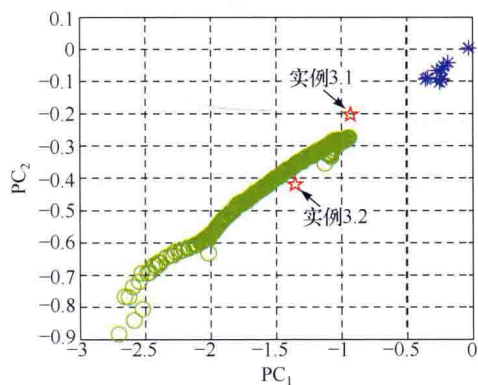


图 3-53 实测故障数据在
PCA 故障识别元件投影

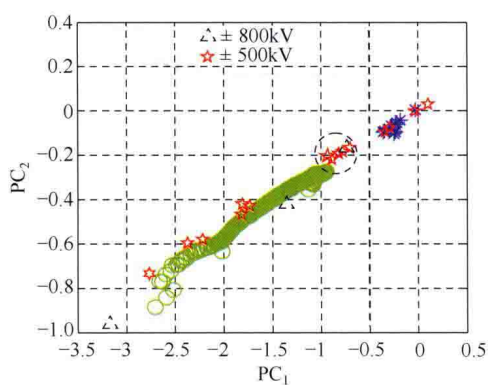


图 3-54 众多实测故障数据在
PCA 故障识别元件投影

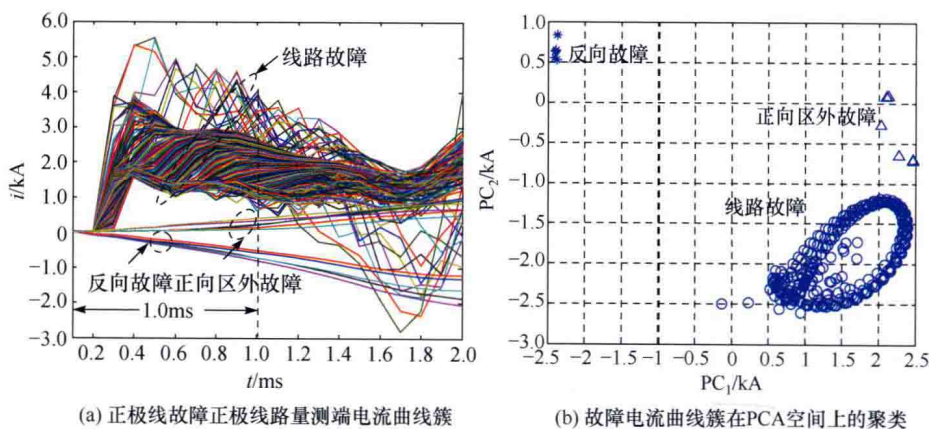


图 4-17 正极线路量测端故障电流曲线簇及其在 PCA 空间上的聚类

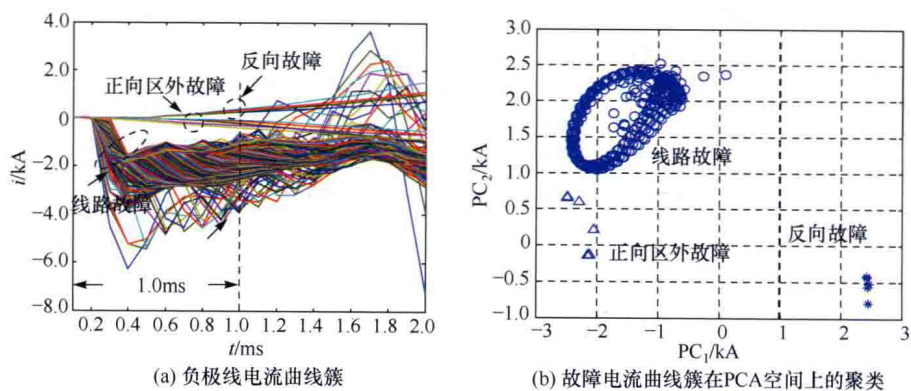


图 4-18 负极线路量测端故障电流曲线簇及其在 PCA 空间上的聚类

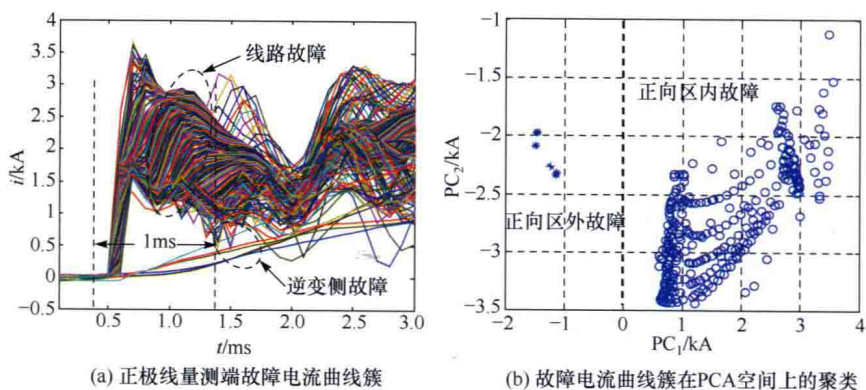
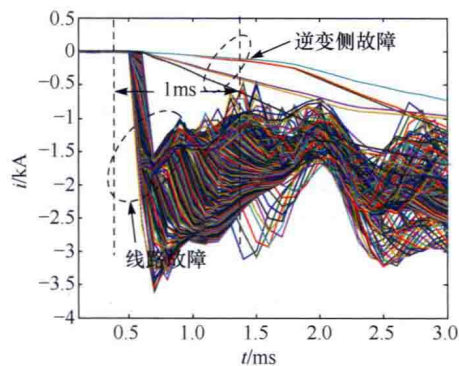
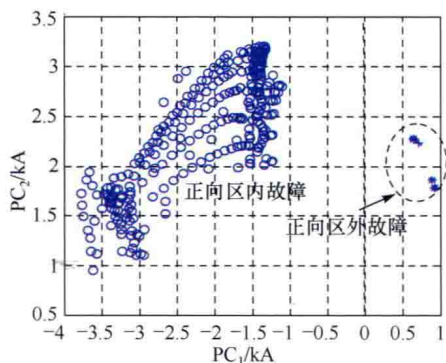


图 4-20 正向故障下正极线路量测端的故障电流曲线簇及其在 PCA 空间上的聚类

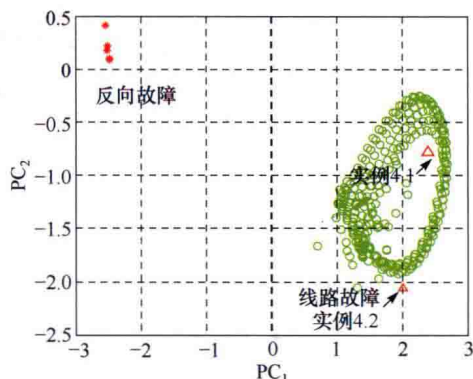


(a) 负极线量测端故障电流曲线簇

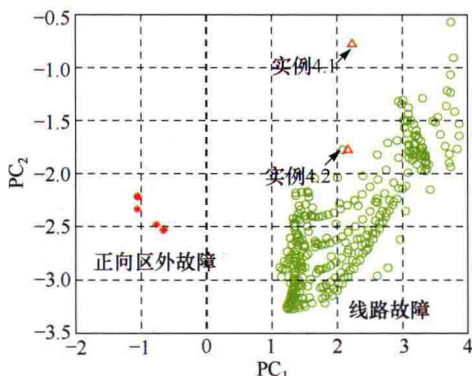


(b) 故障电流在PCA空间上的聚类

图 4-21 正向故障下负极线路量测端的故障电流曲线簇及其在 PCA 空间上的聚类

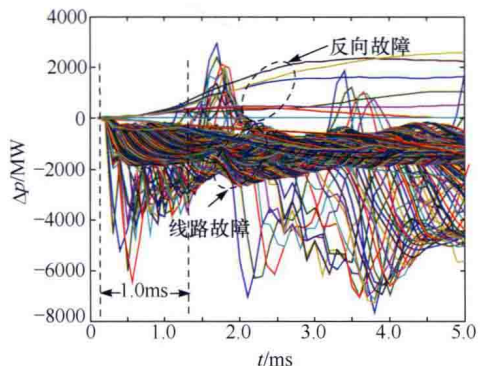


(a) PCA方向元件的判别结果

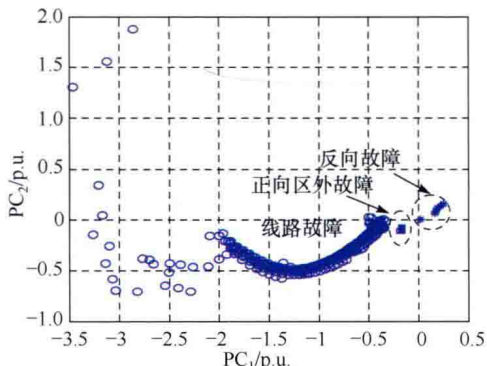


(b) PCA正向区内外故障识别元件的判别结果

图 4-27 基于单端极线电流 PCA 全线速动保护测试结果



(a) 线路故障和区外故障下的 Δp 曲线簇



(b) Δp 曲线簇在PCA空间上的聚类结果

图 4-28 极线瞬时功率 Δp 曲线簇及其在 PCA 空间的聚类结果

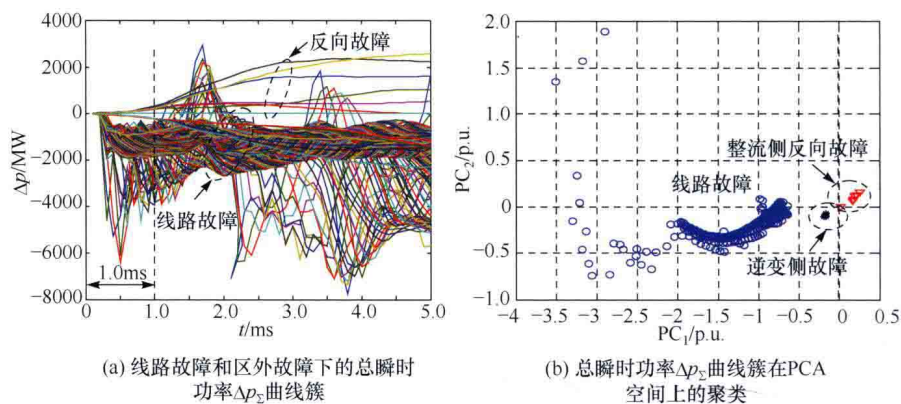


图 4-30 两极线总瞬时功率 Δp_{Σ} 曲线簇及其在 PCA 空间的聚类

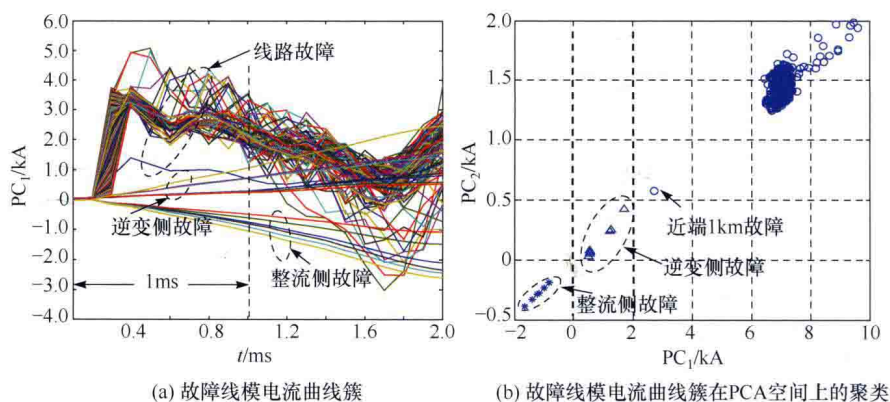


图 4-31 线模电流曲线簇和故障电流曲线簇在 PCA 空间上的聚类

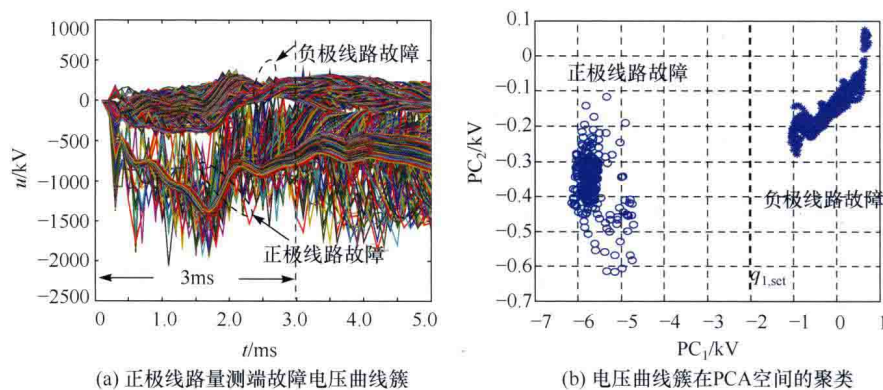


图 5-18 正极线路故障和负极线路故障下正极线路量测端电压曲线簇及其 PCA 聚类结果

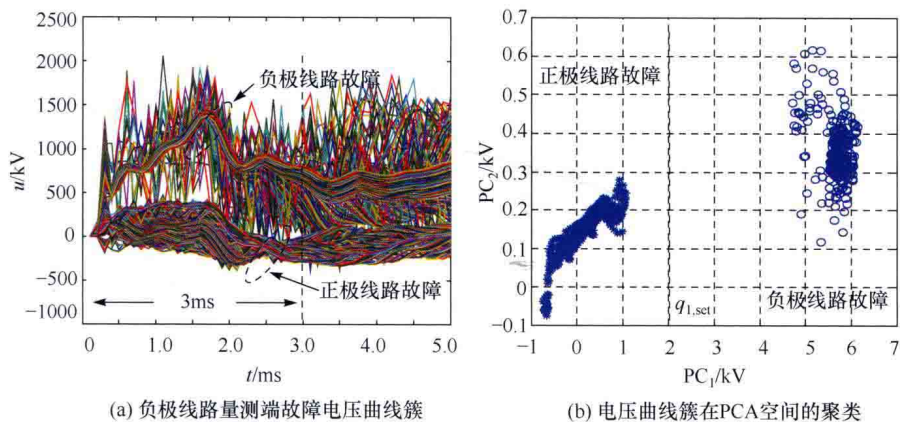


图 5-19 负极线路故障和正极线路故障下负极线路量测端曲线簇及其 PCA 聚类结果

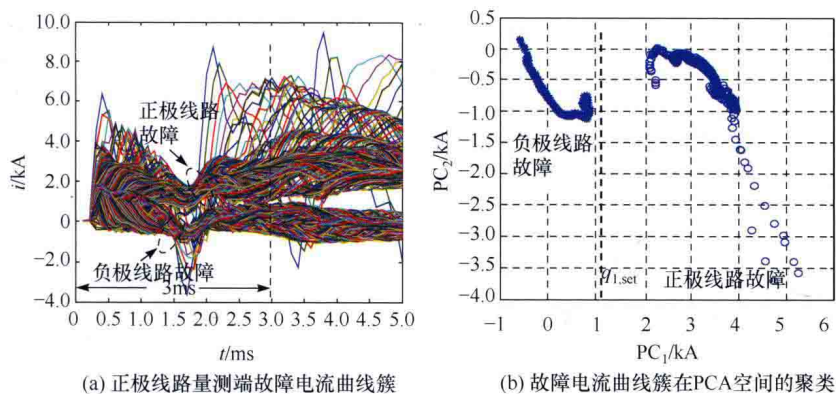


图 5-21 正极线路故障和负极线路故障下正极线路量测端电流曲线簇及其 PCA 聚类结果

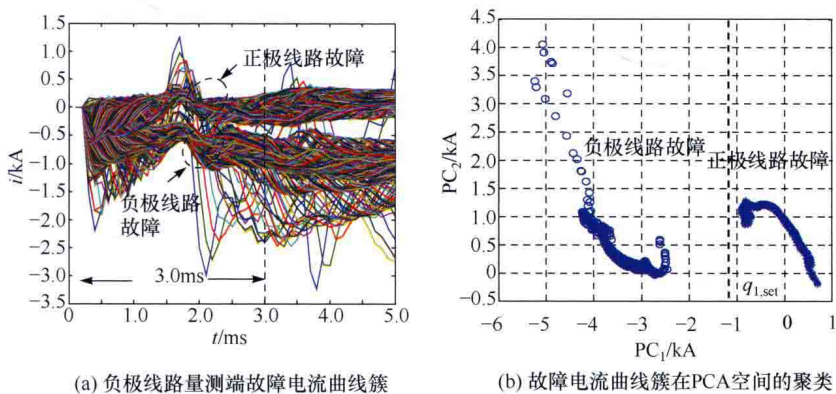


图 5-22 负极线路故障和正极线路故障下负极线路量测端电流曲线簇及其 PCA 空间聚类

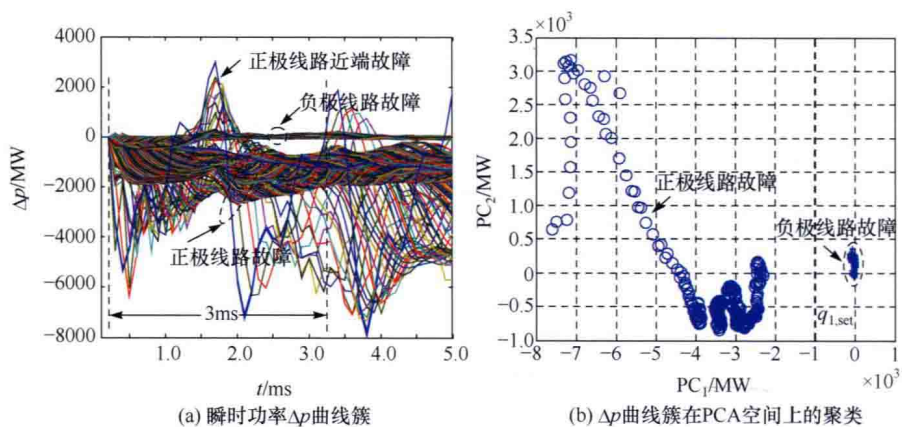


图 5-24 正极线路量测端瞬时功率 Δp 曲线簇及在 PCA 空间上的聚类

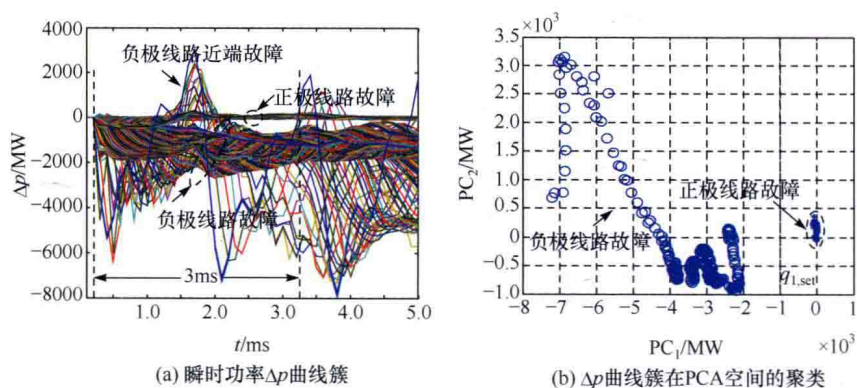


图 5-25 负极线路量测端瞬时功率 Δp 曲线簇及在 PCA 空间上的聚类

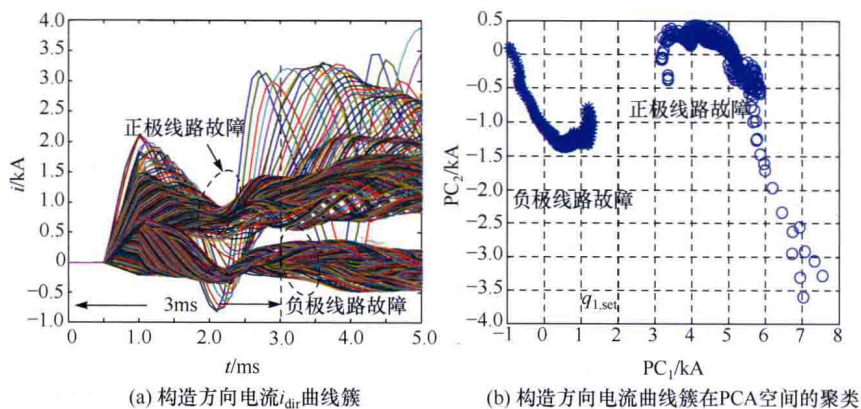


图 5-28 正极线路故障和负极线路故障下正极线路量测端的构造方向电流曲线簇及其在 PCA 空间的聚类

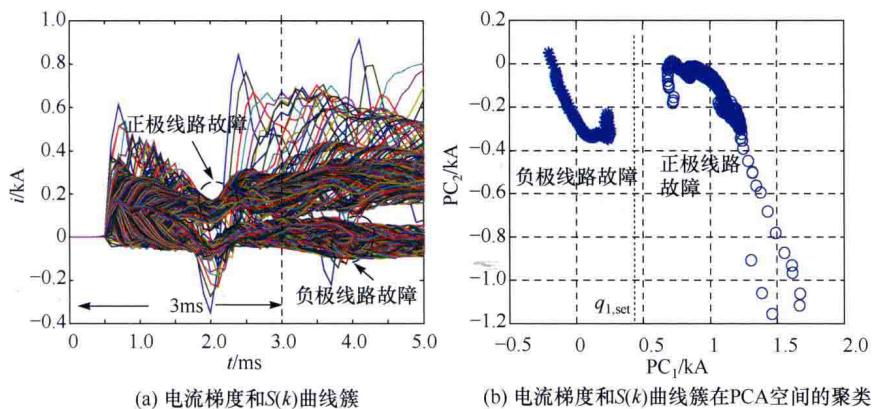


图 5-29 HVDC 线路故障下正极线路量测端电流梯度和 $S(k)$ 曲线簇及其在 PCA 空间的聚类

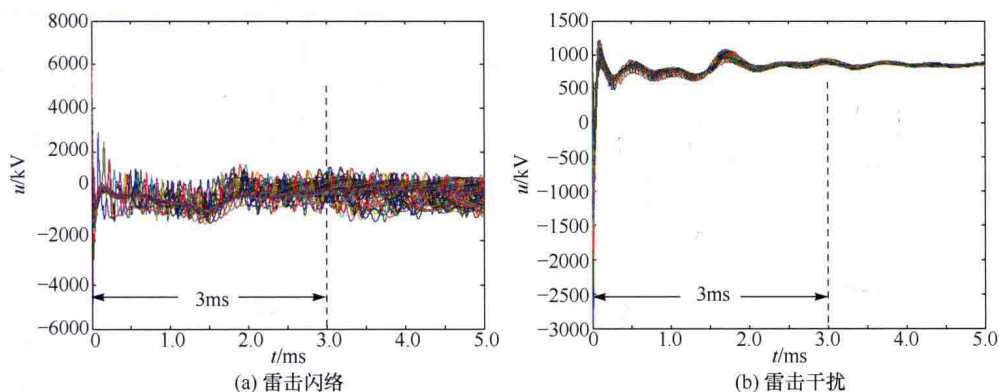


图 6-19 雷击正极输电线路闪络和未闪络情况下其量测端电压曲线簇

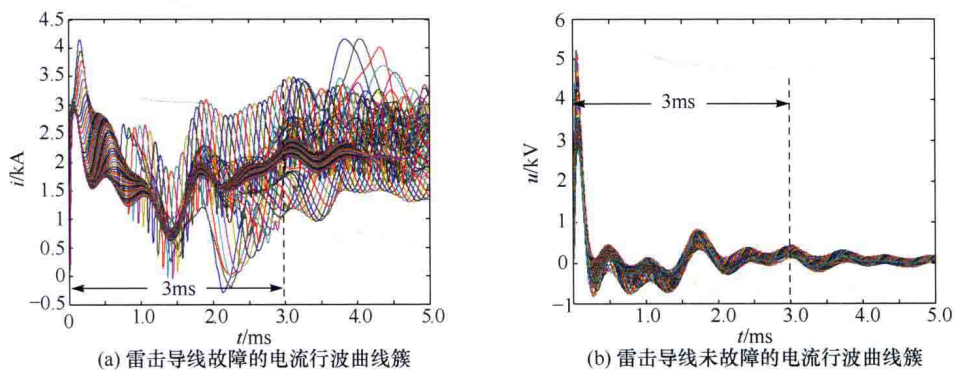


图 6-22 雷击正极输电线路故障和未故障情况下正极线路量测端电流曲线簇