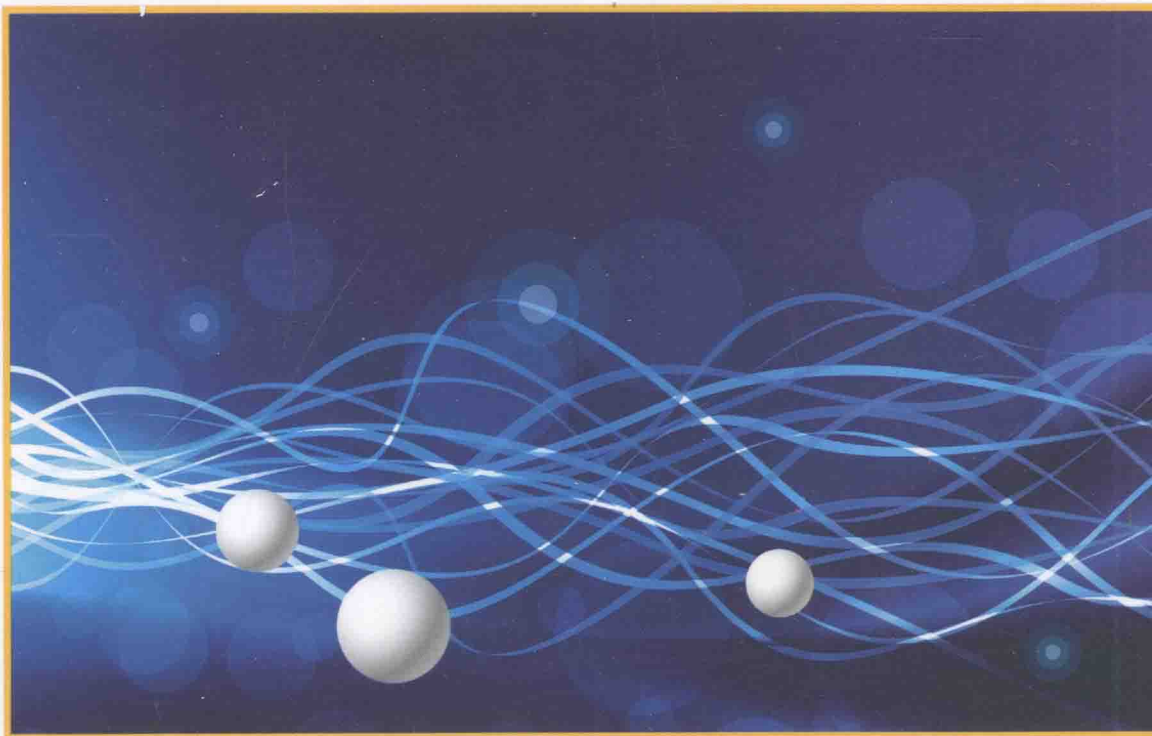




工矿电网漏电保护

GONGKUANG DIANWANG LOUDIAN BAOHU



赵建文 侯媛彬 著



GONGKUANG DIANWANG
LOUDIAN BAOHU



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

工矿电网漏电保护

赵建文 侯媛彬 著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书的主要内容是基于暂态过程特征的矿井电网漏电保护研究,全书内容以漏电故障规律的研究和利用故障规律的保护方法研究为顺序,理论分析、仿真验证和实验贯穿其中。全书共7章,其中第1章简要介绍了传统稳态漏电保护的理論;第2章为漏电暂态过程建模与特征规律分析;第3章至第5章为基于暂态过程的漏电保护方法,涵盖信号距离度方法、改进灰色绝对关联度方法及融合选漏方法;第6章为暂态条件下的电网绝缘参数辨识;第7章为微机漏电保护装置介绍。本书还给出了基于MATLAB的漏电故障仿真和算法分析。

本书是国内第一本论述矿井电网漏电暂态保护技术的专著,可供矿井电网安全运行与保护及工矿企业供配电领域的科研、开发、运行等工程领域的技术人员和高校教师参考,也可供安全技术与工程、电气工程及其自动化、机电一体化等专业的研究生选用。

图书在版编目(CIP)数据

工矿电网漏电保护 / 赵建文, 侯媛彬著. —西安:

西安电子科技大学出版社, 2013.8

ISBN 978-7-5606-3082-3

I. ① 工… II. ① 赵… ② 侯… III. ① 电力系统—
漏电保护 IV. ① TM07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 168298 号

策划编辑 马乐惠

责任编辑 马乐惠 张 瑜

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 12

字 数 277千字

印 数 1~2000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-3082-3/TM

XDUP 337400 1-1

*** 如有印装问题可调换 ***

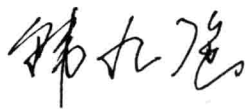
本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

《工矿电网漏电保护》对现有的漏电保护技术进行了全面的论述,建立了电网漏电的暂态瞬时序网络模型,给出了部分漏电特征量的解析数学模型,揭示了部分漏电暂态过程的机理、特征规律,丰富了漏电保护的理论。该书还对基于暂态过程的漏电保护方法进行了探讨,如信号距离度模型漏电识别、改进灰色绝对关联度选漏、基于D-S证据理论信息融合的选漏方法,对于发展新型漏电保护技术具有积极的作用。书中论述的基于可变遗忘因子最小二乘绝缘参数分支辨识方法是电网绝缘检测的新技术。该书也体现了模式识别、系统辨识、人工智能等相关技术在矿井电网保护中应用的新探索。附录中给出的相关漏电保护算法的源程序,为相关工程技术人员和科研工作者提供了参考,为读者提供学习和模仿的样本。

该书的第一作者赵建文博士,现为西安科技大学副教授,硕士生导师,电力工程系副主任,陕西省自动化学会会员,曾于2010年至2011年在华中科技大学国家重点学科——电气工程学科从事访问学者研究,曾获校“优秀青年教师”、“师德标兵”等荣誉称号,长期从事电网安全运行与保护方面的科研与教学工作,特别在矿井电网漏电保护及小电流接地故障识别方面经验丰富,主持参与科研项目10余项,获得国家专利4项,在国外期刊发表论文30篇,EI检索8篇,主编(参编)出版教材2部。本书的第二作者侯媛彬教授,为西安科技大学博士生导师,陕西省重点学科“控制理论与控制工程”学科带头人,中国自动化学会教育委员会委员,陕西省自动化学会常务理事及教育委员会主任;在国内外期刊发表论文120余篇,其中EI检索40余篇,出版专著、教材11部,承担省部级及横向科研项目20余项,获得国家专利4项,其中发明专利2项,获得科技进步奖和教学方面的各种奖项16项。本书正是作者多年研究积累的成果,书中的部分技术获得了西安科技大学科学技术一等奖。

该书给出的漏电暂态过程的特征、暂态快速漏电保护的方法等都是作者具有特色的创新性研究成果,具有较高的学术与工程应用价值,是目前已有的著作中所未涉及的。在国家高度重视煤矿瓦斯事故的背景条件下,该书的出版对漏电保护新的发展以及煤矿安全生产具有积极的作用。



2012年10月于西安交通大学

前 言

漏电是煤矿井下低压电网的主要故障形式之一,漏电故障容易导致电火花的产生,引发瓦斯煤尘爆炸事故。因此,特殊的煤矿生产环境,对矿井低压电网漏电保护提出了非常严格的可靠性、速动性、选择性要求,必须做到可靠判漏、立即动作跳闸、准确切除故障线路,相比地面同类故障保护的要求要高。由于漏电故障过程机理复杂、漏电稳态信号微弱、随机干扰等原因,矿井电网漏电的有效识别一直是较难的课题。

近年来,我国矿井瓦斯爆炸事故时有发生,漏电保护在煤矿生产中的需求程度更为迫切,特别是对选择性漏电保护的需求更甚。选择性漏电保护可以在漏电时仅切除故障支路电源,保证故障条件下最大范围的持续供电。但现场的走访和从煤矿设备生产企业反馈的情况表明,选择性漏电保护装置的现场运行效果并不理想,保护装置不能正确选漏,没有发挥应有作用,只能采用人工拉闸的方法检查。因此在新的形势与技术条件下,深入研究漏电保护技术,显得极为必要。

传统的理论研究和漏电保护的设计均以稳态分析的结果为依据,未能考虑电网漏电发生后的暂态过程。随着现代微电子技术的发展,特别是高速处理器件和高性能光传感器的出现,为暂态过程的检测提供了可能,而执行开关动作速度的提高,有可能使得许多漏电故障在暂态过程尚未结束之前就被切除。实际上漏电故障发生时,系统先经过一个暂态过渡过程,然后进入漏电故障稳态阶段。如果能利用漏电暂态过程的特征来识别漏电,就意味着可以提高漏电保护的识别速度,缩短由于故障电流而导致人身触电的时间,从而提高煤矿供电的安全性。从这个角度来说,现代漏电保护绝不能忽略漏电暂态过程的电气参数。

漏电保护水平的提高与许多学科技术相关。计算机技术、通信技术、智能检测技术、现代信号处理技术、高性能微控器技术、传感器技术等的发展,为基于暂态过程特征的漏电保护的研究提供了良好物质基础。本书正是基于此,通过研究暂态过程的特征,来探索漏电保护的新途径。

当今智能化已经成为电网发展的必然趋势,发展智能电网在世界范围内已形成共识。智能电网发展的一个重要方面就是,建立高速、双向、实时、集成的电力通信系统,使智能电网成为一个动态的、实时信息和电力交换互动的大型基础设施。在智能电网技术的发展目标下,矿井电网作为整个电网的组成部分,其网络智能化的发展也成为一种必然,位于不同位置的矿井电网保护设备可以高效传送、共享使用、集中处理故障数据。在此基础上,故障的判断可以利用更广范围内的特征信息,进行融合处理、综合判断,从而提高漏电保护的可靠性,这将有别于仅利用独立点的故障信息进行保护的思想。

本书结合作者多年来在矿井电网漏电保护领域的研究成果,以漏电暂态过程机理特征的分析、基于暂态过程特征的漏电识别判据的构造、融合选漏、绝缘状态预测等思想为主导,深入研究了漏电保护问题和漏电识别方法。全书共分为7章:第1章简要地介绍了传

统稳态漏电保护的理論,分析了漏电稳态特征量的关系、特点,并给出了暂态漏电保护研究的背景及可行性;第2章论述了矿井电网漏电的暂态瞬时序网络模型以及漏电的部分暂态特征规律;第3章从快速辨识复杂漏电信号的要求出发,提出了信号距离度模型的相关概念,讨论了其应用特性;第4章论述了利用暂态特征及信号距离度辨识的漏电识别保护方法;第5章论述了改进灰色绝对关联度分析的漏电识别方法,并探索了基于D-S证据融合的选漏判据、策略及方法;第6章为基于漏电故障数据的绝缘参数辨识方法;第7章为现代微机漏电保护装置的介绍。本书提供了许多对漏电识别的方法进行验证的仿真和实验的数据算例。附录给出了作者开发的相关算法的程序。

本书由西安科技大学赵建文、侯媛彬著,侯媛彬撰写了第3章与第6章,其余部分内容
由赵建文撰写。

研究生孙尚斌、陈雪洁等在书稿的绘图等方面给予了很大的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

本书的成稿得到了诸多专家的帮助,本书的出版得到了西安科技大学安全技术及工程国家级重点学科、控制理论与控制工程省级重点学科的资助,在此一并表示感谢。

本书部分图由MATLAB生成,由于MATLAB功能的限制,图中符号与国标有所不同,请读者阅读时注意文中符号与图中符号的对应。

本书在撰写的过程中参考了大量文献,谨此向文献的作者致谢,并向诸多为漏电保护技术的发展付出心血的同行致敬。

限于作者的水平和能力,书中不妥之处在所难免,敬请读者包涵并批评指正。

作 者

2013年3月

目 录

第 1 章 漏电保护及其研究基础	(1)
1.1 漏电故障及触电危险	(1)
1.1.1 漏电故障	(1)
1.1.2 触电危险	(2)
1.2 矿井漏电保护	(3)
1.3 漏电正弦稳态过程特征分析	(5)
1.3.1 单相漏电序网络	(5)
1.3.2 单相漏电特征量的变化规律	(9)
1.4 传统稳态漏电保护原理	(15)
1.4.1 附加直流电源的保护	(15)
1.4.2 零序功率方向保护	(16)
1.4.3 旁路接地保护	(19)
1.5 现代漏电研究背景和意义	(21)
1.6 国内外漏电保护研究现状及趋势	(22)
1.6.1 国内外相关研究概况	(22)
1.6.2 现有漏电保护方法分析评价	(23)
1.6.3 现代漏电保护发展趋势	(25)
1.7 我国漏电保护问题探讨	(26)
1.8 研究内容	(29)
第 2 章 矿井电网单相漏电暂态过程特征分析及仿真	(32)
2.1 引言	(32)
2.2 单相漏电暂态过程建模分析	(32)
2.2.1 漏电等效模型	(32)
2.2.2 漏电暂态过程物理量数学描述	(34)
2.3 单相漏电瞬时序网络模型	(37)
2.3.1 瞬时对称分量法	(37)
2.3.2 单相漏电瞬时序网络模型的建立	(39)
2.3.3 基于漏电瞬时序网络的零序特征量求解	(44)
2.4 单相漏电故障特征仿真分析	(47)
2.4.1 仿真模型的建立	(47)
2.4.2 理论模型准确性验证	(49)
2.4.3 漏电电阻与故障特征量的关系	(50)

2.4.4 漏电角与暂态过程量的关系	(53)
2.4.5 故障点与暂态过程量的关系	(57)
本章小结	(58)
第 3 章 信号距离模型的建立	(60)
3.1 信号距离概念的提出	(60)
3.2 信号距离函数及信号距离度函数构造	(61)
3.2.1 信号距离函数	(61)
3.2.2 信号距离度函数	(62)
3.3 时域有限的因果信号的距离函数	(63)
3.4 信号距离模型的性质、距离器及距离度空间的定义	(65)
3.4.1 信号距离模型的性质及距离器	(65)
3.4.2 信号集合的距离度空间	(66)
3.5 离散信号距离度与相关系数比较	(69)
本章小结	(71)
第 4 章 基于信号距离的漏电识别	(72)
4.1 信号自距离度漏电真快速识别	(72)
4.1.1 漏电真识别方法的提出	(72)
4.1.2 漏电前后暂态零序电压波形特征	(72)
4.1.3 漏电真识别算法	(73)
4.1.4 漏电真识别算法适应性仿真分析	(74)
4.1.5 系统电压波动影响的消除及验证	(76)
4.2 漏电真识别方法试验验证	(77)
4.2.1 矿井模拟电网试验系统	(77)
4.2.2 漏电真识别算法试验结果分析	(78)
4.3 基于信号互距离度的选漏方法	(79)
4.3.1 暂态阶段波形识别选漏的提出	(79)
4.3.2 波形识别选漏原理	(80)
4.3.3 基于信号互距离度的选漏算法构造	(80)
4.4 选漏方法仿真验证	(83)
4.4.1 选漏仿真算例	(83)
4.4.2 选漏算法适应性仿真分析	(85)
4.4.3 选漏算法抗干扰能力	(87)
4.5 选漏试验验证	(88)
4.5.1 试验算例分析	(88)
4.5.2 试验数据结果分析	(89)
本章小结	(90)
第 5 章 改进灰色绝对关联度选漏及融合选漏	(91)
5.1 灰色绝对关联度选漏的提出	(91)
5.2 灰色绝对关联度改进	(92)

5.2.1 绝对关联度缺陷分析	(92)
5.2.2 改进的灰色绝对关联度模型建立	(94)
5.2.3 离散信号距离度与改进绝对关联度的比较分析	(98)
5.3 改进灰色绝对关联度选漏方法	(99)
5.3.1 改进绝对关联度选漏算法构造	(99)
5.3.2 改进绝对关联度选漏方法仿真验证	(103)
5.3.3 改进绝对关联度选漏方法试验验证	(107)
5.4 融合选漏的提出	(109)
5.4.1 融合选漏的必要性	(109)
5.4.2 融合选漏方式选择	(110)
5.5 证据理论融合互距离度和改进灰色绝对关联度选漏	(112)
5.5.1 融合选漏算法构造	(112)
5.5.2 融合选漏方法仿真验证	(114)
5.5.3 融合选漏方法试验验证	(117)
本章小结	(118)
第6章 矿井电网绝缘参数分支辨识	(119)
6.1 绝缘参数分支辨识的必要性	(119)
6.2 漏电试验模型的建立	(120)
6.3 可变遗忘因子 RLS 绝缘参数辨识原理	(122)
6.3.1 可变遗忘因子 RLS 算法与参数辨识	(122)
6.3.2 绝缘参数辨识算法构建	(124)
6.4 绝缘参数辨识仿真验证	(126)
6.4.1 仿真模型	(126)
6.4.2 算法的绝缘参数辨识比较分析	(126)
6.4.3 绝缘参数识别准确性验证	(128)
本章小结	(130)
第7章 微机漏电保护装置	(131)
7.1 漏电保护装置概述	(131)
7.2 真空馈电开关中的漏电保护单元	(132)
7.2.1 矿用低压真空馈电开关	(132)
7.2.2 漏电保护单元组成	(132)
7.2.3 漏电保护单元功能参数	(136)
7.3 零序电流方向的选择性漏电保护系统	(137)
7.3.1 系统构成	(137)
7.3.2 附加直流源检测的漏电保护单元	(137)
7.3.3 零序电流方向选择性漏电保护单元	(139)
7.3.4 试验验证分析	(141)
7.4 可通信式选择性漏电保护系统	(141)
7.4.1 单片机为控制核心的可通信式漏电保护方案	(142)

7.4.2 单片机与 DSP 为控制核心的可通信式漏电保护方案	(144)
7.4.3 可通信式漏电保护特点	(145)
7.5 自适应综合选漏保护装置	(146)
7.5.1 自适应选漏保护的原理	(146)
7.5.2 自适应选漏保护装置的构成	(147)
7.5.3 自适应漏电保护试验数据及装置功能	(151)
本章小结	(153)
附录	(155)
参考文献	(174)

第1章 漏电保护及其研究基础

本章主要对漏电、触电的含义,传统稳态漏电的特征规律及保护理论展开论述,分析了漏电特征参数随电网的对地绝缘电阻、对地电容、漏电过渡电阻等的变化关系,对现有的较为成熟的附件直流源的保护、零序功率方向保护、旁路接地保护等进行了分析评价,并对现代漏电保护的发展趋势、研究重点进行了探讨。

1.1 漏电故障及触电危险

1.1.1 漏电故障

一般地,大中型的矿山供电电源多取自 35 ~ 110 kV 的电力网,经两回架空线送到矿井地面总降压变电所,将电压降为 6 ~ 10 kV,再向车间、井下变电所及高压用电设备等配电,组成了煤矿高压供电系统。高压电能从矿山地面变电所母线引出,沿井筒电缆送至井下变电所。各变电所经变压器将电压降为 1140 V、660 V(或 380 V)低压,再向采区低压用电设备供电,其中涉及的线路、设备组成了矿井的低压供电系统。

煤矿井下低压电网的设计,主要从防止人身触电、点燃瓦斯和火灾的安全角度考虑。直接接地的方式具有人身触电电流大,故障点形成电弧明显等缺点,不允许使用;而中性点不接地的系统,实现起来简单,且发生触电事故时,人身触电电流小,危险性较低,我国矿井低压电网普遍采用此方式。

矿井生产环境复杂,自然条件恶劣,供电设备易受损坏,可能造成漏电、触电及电火花,引起火灾和瓦斯煤尘爆炸,导致人员伤亡。所以,必须采取防漏电、防触电的措施,确保供电安全。《煤矿安全规程》第 457 条规定,井下低压馈电线上,必须装设检漏保护装置或有选择性的漏电保护装置,保证可自动切断漏电的馈电线路。

目前国内煤矿井下普遍采用变压器中性点绝缘的供电系统。在这种系统中漏电故障是指发生单相接地(包括直接接地和经过渡电阻接地)或两相、三相对地总绝缘下降到危险值的电气故障,简称漏电。

煤矿井下工作条件的特殊性体现在以下几点:

- (1) 井下巷道、硐室和采掘面的空间狭小;
- (2) 电气设备易受掉矸和片帮的砸压;
- (3) 井下空气潮湿,常滴水,电气设备易受潮发霉。

这些不利的因素使得矿井电网容易发生漏电事故。潮湿环境下,多年运行的电缆因绝缘老化或潮气入侵,引起绝缘电阻下降,使正常运行时系统对地绝缘阻抗偏低或过压冲击而发生漏电。在狭窄、较暗的井下巷道中,工人工作时的劳动工具易将电缆割伤或碰伤,造成漏电。另外,修理电气设备时,由于停电操作错误、带电操作或施工不慎,可造成人触及一相而漏电。

根据漏电时各相对地绝缘水平的不同,漏电故障可分为单相漏电、两相漏电和三相漏电。单相漏电和两相漏电属于不对称性漏电,故障发生时产生零序电压和零序电流。在工程中,单相漏电发生的概率最高,约占漏电故障的85%,是漏电研究的主流。两相漏电的概率远不如单相漏电高,且故障程度也比单相漏电轻。三相漏电属于对称性漏电,在低压电网中有一定的发生率,主要表现为电缆、设备等绝缘老化,造成三相对地绝缘水平降低而漏电。

按照漏电发生的位置不同,漏电故障分为集中性漏电和分散性漏电。所谓集中性漏电,是指发生在电网中某一处或某一点的漏电,而其余部分的对地绝缘水平仍然正常。所谓分散性漏电,是指整条线路或整个电网的对地绝缘水平平均下降到低于允许水平的漏电。按照漏电存在的时间长短,集中漏电又分为长期集中性漏电、间歇集中性漏电和瞬间集中性漏电。长期集中性漏电可能是电网内的某台设备或电缆由于绝缘击穿或导体碰及外壳所造成的。间歇集中性漏电大部分发生在电网内某台设备(主要是电动机)或负荷端电缆处,往往是在绝缘击穿或导体碰及外壳时产生的,还可能由于针状导体刺入负荷侧电缆内产生。瞬间集中性漏电主要由于工作人员或其他物体偶尔触及带电导体或电气设备和电缆的绝缘破裂部分,使之与地相连所致,还可能是操作电气设备时产生对地弧光放电所致。

漏电增加了人身触电的危险,漏电产生的电火花增加了引起瓦斯、煤尘爆炸的危险,漏电还可能引起电雷管先期爆炸,烧毁设备并引起火灾。漏电严重影响煤矿安全生产。

地面低压电网中漏电的含义与矿井电网中的略有不同。日常生活中所说的漏电是电器外壳和市电火线间由于某种原因连通后与地之间有一定的电位差产生的。这种漏电发生的系统为中性点直接接地的网络,电压等级为380 V。应用于此低压电网的安全用电保护电器称为剩余电流动作保护器。剩余电流动作保护器在国标GB6829—95新标准颁布之前称为漏电保护器或触电保安器,亦称触电保护器、触漏电保护器。这些保护器的使用是防止人身触电伤亡事故的有效措施,也是防止因漏电引起电气火灾和电气设备损坏事故的技术措施。但漏电保护器与矿井电网的漏电保护装置的原理和特点存在差别。矿井低压电网为中性点绝缘的系统,我国的矿井低压电网常用的电压等级有1140 V、660 V和380 V等。本书主要针对矿井低压电网漏电问题进行研究。

1.1.2 触电危险

人身触及带电体或接近高压带电体并使人身有电流通过,叫做触电。煤矿井下空间范围狭窄、空气潮湿,电气设备和电缆易受砸、压、碰而使绝缘损坏。当电气设备因绝缘损坏而使外壳带电,保护装置失灵,工作人员又接触此外壳时,就会导致人身触电事故,此时入地电流的一部分将从人体流过,其数值达到一定程度就会造成工作人员的伤亡。人身触电对供电系统而言是发生了漏电,但漏电不一定是由触电引起的。

触电对人体组织的破坏大致分为电伤和电击。电伤是指电弧或强电流瞬间通过人体造成伤害。电击是指触电后人体成为电流通路的一部分,电流通过人体引起生理变化,例如感觉疼痛、肌肉收缩、丧失知觉反应、呼吸窒息、心室纤维颤动、心脏停止跳动等。电击对人的危害与许多因素有关,如电流大小、电流种类、电流通过人体的时间、人体电阻、电流通过人体的途径、人的生理状态等。

人体电阻与许多因素有关,主要由皮肤的角质层的电阻和电容决定,此外还与皮肤表面的干湿状况、接触面积、接触电压、触电时间有关。电压在200~1000 V之间时,人体电阻的下限在800~1500 Ω 之间。对于煤矿井下的条件,考虑环境潮湿及出汗等原因,设计漏电保护装置时,人体电阻按1 k Ω 考虑。

流经人体电流的大小和持续时间的长短是影响人身触电危害程度的主要因素。目前世界上许多国家规定30 mA·s为安全值,同时规定通过人体的最大安全电流(交流)为30 mA,我国也有此规定。安全电流是发生触电时,不会使人致死、致伤的通过人体的最大电流。

安全电流与人体电阻的乘积称为安全电压。我国《安全电压标准》规定的交流电安全电压的系列是:42 V、36 V、24 V、12 V和6 V。当设备采用直接接触防护时,只能使用额定值为24 V以下(包括24 V)的安全电压;设备采用间接接触防护时,则可使用额定值为42 V以下(包括42 V)的安全电压。具体来说,42 V(空载上限小于等于50 V)可在有触电危险的场所使用,如手持式电动工具等的使用;36 V(空载上限小于等于43 V)可在矿井、多导电粉尘等场所使用,如行灯等的使用;24 V、12 V、6 V(空载上限分别小于或等于29 V、15 V、8 V)三挡可供某些人体可能偶然触及的带电体设备选用。

1.2 矿井漏电保护

1. 漏电保护

漏电保护的主要目的是通过切断电源的操作来防止人身触电伤亡和漏电电流引爆瓦斯煤尘。漏电保护的类型有漏电跳闸和漏电闭锁两种。

漏电跳闸是指在电网的对地绝缘电阻值降到规定的跳闸动作值或人触及线路时,使线路开关跳闸,切断电源。漏电容易产生电火花,有引发爆炸的危险,特殊的煤矿生产环境对矿井电网漏电保护提出了非常严格的要求,必须可靠判断故障,立即动作与跳闸,准确切除故障线路;而地面中压电网的单相接地故障可只动作于信号,特别对于单相漏电,这一跳闸要求不同于地面中压电网的单相接地故障的处理。

漏电闭锁主要用在低压电网,其作用是对电动机及供电电缆的绝缘水平进行合闸前的监视。当绝缘电阻降低到规定值以下或发生漏电时,漏电闭锁保护装置动作,将控制开关或磁力启动器闭锁,使之不送电。漏电闭锁只在断电状态下监视供电线路,当主回路带电工作时,它退出工作。漏电闭锁依据的是附加直流源的漏电保护原理。

2. 对漏电保护要求的讨论

漏电保护属于电力系统继电保护的范畴,所以应该满足继电保护装置在技术上的四个基本要求:选择性、速动性、灵敏性和可靠性。这四个要求在漏电保护中的具体体现如下:

1) 选择性

对漏电保护系统而言,选择性是指保护装置动作时,应在可能小的范围内将漏电故障部分从矿井供电系统中切除,尽量缩小停电的范围,最大限度地保证系统非故障部分的继续运行。漏电保护的选择性是煤矿供电可靠性的要求,具有选择性的漏电保护可以在某一支路故障的情况下,做到正常支路负荷供电的不中断。一般在放射式矿井供电系统中,漏电保护只切除故障支路,其余支路均能正常供电;在干线式系统中,当支线漏电则切除故障支路,当干线漏电则切除该干线的电源;混合式供电系统中,可根据情况设定保护,切除相应支路。漏电保护的选择性有横向选择性与纵向选择性之分,横向选择性通过保护的原理方法来保证,纵向选择性依靠延时实现。JB6314—92 标准《矿用隔爆型检漏继电器》规定,具有选择性漏电保护的检漏继电器,应设有延时环节,各级延时的级差时间为 200 ~ 250 ms,具有旁路接地保护又具有选择性漏电保护的检漏继电器,其各级延时级差时间为 250 ~ 300 ms;其中旁路接地检漏继电器的动作时间应满足大于 30 ms,但小于或等于 50 ms,动作后延时 150 ~ 200 ms 须恢复到初始状态。

2) 速动性

所谓速动性,是指保护装置应尽可能快地切除故障,减少设备带故障运行时间,降低设备的损坏程度。由于煤矿井下生产环境的特殊性,漏电保护的速动性是与其矿井供电的安全性联系在一起的,是保护人身防止触电,防止瓦斯煤尘爆炸的要求。漏电容易产生电火花,若电火花具有足够的能量,就可能点燃瓦斯和煤尘,而速动性可以通过提高保护的動作速度,降低电火花能量来降低事故风险。目前,对人身触电的安全性,国际上通用的是用允许安秒值($30\text{ mA} \cdot \text{s}$)规定。它表明在触电电流与触电持续时间的乘积小于等于 $30\text{ mA} \cdot \text{s}$ 的情况下,触电人员将是安全的,因此提高保护装置的動作速度对人身安全具有重要的意义。我国的 JB6314—92 标准规定了不同类型的检漏继电器的動作时间要求。具有漏电跳闸保护功能的检漏继电器、具有跳闸及漏电闭锁功能的检漏继电器、具有选择性漏电跳闸或漏电闭锁功能的检漏继电器、人为旁路接地保护部分(主要用于 660 V 系统)等,经 $1\text{ k}\Omega$ 电阻单相漏电的動作时间要求如表 1.1 所示。

表 1.1 经 $1\text{ k}\Omega$ 电阻单相漏电的動作时间

检漏继电器类型	動作时间/ms		
	380 V 系统	660 V 系统	1140 V 系统
具有漏电跳闸保护功能	≤ 100	≤ 80	≤ 50
具有跳闸及漏电闭锁功能	≤ 100	≤ 80	≤ 50
具有选择性漏电跳闸或漏电闭锁功能	≤ 30	≤ 30	≤ 30
人为旁路接地保护部分		≤ 50	

3) 灵敏性

漏电保护的灵敏性是指保护装置对其保护范围内所发生故障的反应能力。灵敏性要求

保护装置在事先规定的保护范围内发生故障时,不论故障点的位置、类型如何,都能敏锐感觉、正确反应。灵敏性要求保护对最轻的漏电故障也能可靠进行动作,对临界漏电故障具有较强的反应能力。JB6314—92 标准规定了漏电动作电阻值,如表 1.2 所示。

表 1.2 漏电动作电阻值

检漏继电器类型	单相漏电动作电阻整定值(k Ω)/漏电闭锁电阻整定值(k Ω)		
	380 V 系统	660 V 系统	1140 V 系统
具有漏电跳闸保护功能	3.5/7	11/22	20/40
具有跳闸及漏电闭锁功能	3.5/7	11/22	20/40
具有选择性漏电跳闸或漏电闭锁功能	3~7	5~13	5~20
人为旁路接地保护部分		3	

注:三相漏电动作电阻值为单相漏电电阻值的 3 倍,其偏差不大于 $\pm 20\%$ 。

4) 可靠性

漏电保护的可靠性要求漏电保护装置不拒动,也不误动,即在本保护单元内发生漏电故障时,保护一定动作,而在本供电单元外发生任何故障或单元内发生非漏电故障时,保护一定不动作。漏电保护的可靠性与漏电保护原理方法的可靠性直接相关,其次与保护装置设计的结构、元件质量、制造装配工艺等有关。煤矿井下电磁环境的复杂性会影响漏电保护的可靠性,特别是对漏电支路的准确判断有影响。

1.3 漏电正弦稳态过程特征分析

1.3.1 单相漏电序网络

电网一旦发生漏电,原来三相对称的运行状态就要发生变化,系统运行的特征参数就会发生变化,漏电保护原理及装置的研究正是以这些特征参数的变化为基础的。本节利用对称分量法对单相漏电的稳态过程进行分析,给出漏电发生后各相对地电压、漏电电流、零序电压、零序电流等特征量,并分析不同的电网结构参数、漏电过渡电阻对特征量的影响。本节内容是稳态漏电保护的理论依据,为了便于分析,在推导运算中作了如下假设:

- (1) 认为变压器是无限大容量供电电源,其内阻抗为零,输出电压保持恒定;
- (2) 每相分布电容用集中电容 c 表示,每相分布绝缘电阻用集中绝缘电阻 r 表示;
- (3) 由于我们研究的是纯电缆线路,故假设各相对地电阻相等,各相对地电容相等,且忽略线路的电阻和电感;

(4) 负荷是对称的,对零序电流没有影响,因此我们可以只研究空载时单相漏电的有关特性;

- (5) 稳态分析中不考虑谐波影响的问题,即认为电流电压均为严格的正弦波。

具有 N 条馈出回路的矿井供电系统漏电如图 1-1 所示。该系统为变压器中性点不

接地电网； $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 和 $\dot{U}_C$ 为电源电压； r_k 和 c_k 为第 k 条支路的对地绝缘电阻和对地电容； R_g 为 A 相漏电的过渡电阻，人身触电时， R_g 代表人身电阻； $\dot{U}_{ag}$ 、 $\dot{U}_{bg}$ 和 $\dot{U}_{cg}$ 为各相的对地电压； $\dot{U}_N$ 为中性点的对地电压。

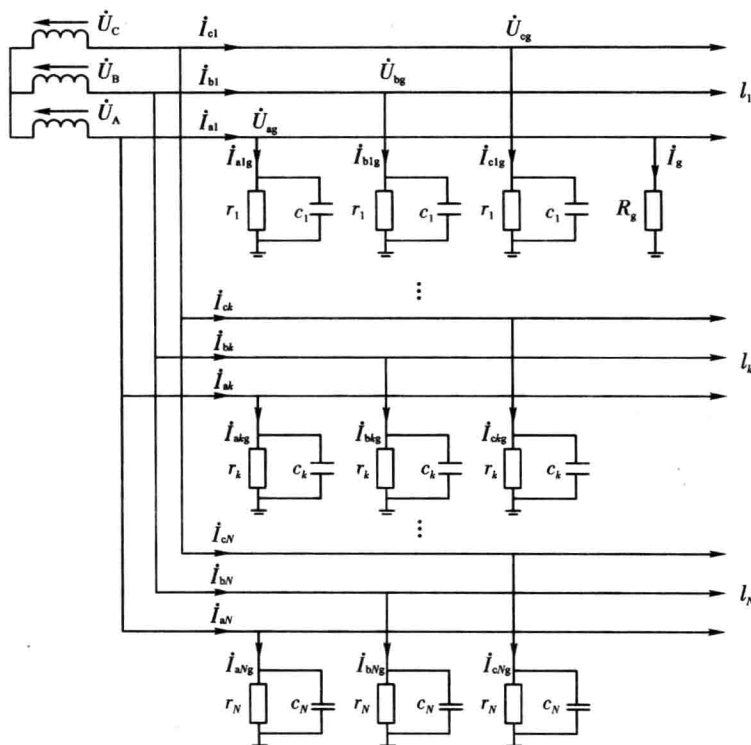


图 1-1 矿井供电系统漏电图

对称分量法是分析不对称故障的常用方法。根据对称分量法，一组不对称的三相量可以分解为正序、负序和零序三相对称的量。

1. 对地电压对称分量分解

发生 A 相漏电时，各相对地电压为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ag} \\ \dot{U}_{bg} \\ \dot{U}_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_A + \dot{U}_N \\ \dot{U}_B + \dot{U}_N \\ \dot{U}_C + \dot{U}_N \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

根据对称分量法，对地电压的正序分量 $\dot{U}_{ag1}$ 、负序分量 $\dot{U}_{ag2}$ 和零序分量 $\dot{U}_{ag0}$ 为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ag1} \\ \dot{U}_{ag2} \\ \dot{U}_{ag0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A + \dot{U}_N \\ \dot{U}_B + \dot{U}_N \\ \dot{U}_C + \dot{U}_N \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

即

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ag1} \\ \dot{U}_{ag2} \\ \dot{U}_{ag0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{U}_A + \alpha \dot{U}_B + \alpha^2 \dot{U}_C + \dot{U}_N + \alpha \dot{U}_N + \alpha^2 \dot{U}_N \\ \dot{U}_A + \alpha^2 \dot{U}_B + \alpha \dot{U}_C + \dot{U}_N + \alpha^2 \dot{U}_N + \alpha \dot{U}_N \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C + 3\dot{U}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ 0 \\ \dot{U}_N \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

其中: $(\dot{U}_A + \alpha\dot{U}_B + \alpha^2\dot{U}_C)/3 = \dot{U}_A$ 为电源电压的正序分量; $\dot{U}_A + \alpha^2\dot{U}_B + \alpha\dot{U}_C = 0$, 说明电源电压的负序分量为 0; $\dot{U}_N + \alpha^2\dot{U}_N + \alpha\dot{U}_N = 0$, 说明中性点对地电压的正序分量和负序分量均为 0。式(1.3)表明单相漏电时, 对地电压的正序分量等于电源电压, 负序分量为零, 零序分量等于中性点的对地电压。

2. 对地绝缘电阻和对地电容部分的对称分量分解

对第 k 条支路, 对地绝缘电阻和对地电容的电流和电压的关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ag} \\ \dot{U}_{bg} \\ \dot{U}_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg} \\ \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{bkg} \\ \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{ckg} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

式(1.4)两边乘以 $S = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, 进行对称分量变换, 得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ag1} \\ \dot{U}_{ag2} \\ \dot{U}_{ag0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg1} \\ \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg2} \\ \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg0} \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

其中: $\begin{bmatrix} \dot{I}_{akg1} \\ \dot{I}_{akg2} \\ \dot{I}_{akg0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{akg} + \alpha\dot{I}_{bkg} + \alpha^2\dot{I}_{ckg} \\ \dot{I}_{akg} + \alpha^2\dot{I}_{bkg} + \alpha\dot{I}_{ckg} \\ \dot{I}_{akg} + \dot{I}_{bkg} + \dot{I}_{ckg} \end{bmatrix}$, 为对地电流正序、负序、零序分量。令零序电压 $\dot{U}_0 =$

$\dot{U}_{ag0}$, 有

$$\begin{cases} \dot{U}_{ag1} = \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg1} = \dot{U}_A \\ \dot{U}_{ag2} = \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg2} = 0 \\ \dot{U}_{ag0} = \left(\frac{1}{r_k} + j\omega c_k\right) \dot{I}_{akg0} = \dot{U}_0 \end{cases} \quad (1.6)$$

3. 漏电边界条件对称分量分解

对故障支路而言, 单相漏点故障处的电流边界条件为: $\dot{I}_{fa} = \dot{I}_g$, $\dot{I}_{fb} = 0$, $\dot{I}_{fc} = 0$, 则故障点的电流的正序、负序、零序分量为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_{f2} \\ \dot{I}_{f0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{I}_g}{3} \\ \frac{\dot{I}_g}{3} \\ \frac{\dot{I}_g}{3} \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

式(1.7)表明, 故障点的正序、负序、零序电流相等, 且等于漏电电流的 $1/3$ 。