

DIANLI XITONG JIDIAN BAOHU YANJIU——WENJI

电力系统继电保护研究

——文集

陈德树◎著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

DIANLI XITONG JIDIAN BAOHU YANJIU——WENJI

电力系统继电保护研究

——文集

陈德树◎著



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

电力系统继电保护研究——文集/陈德树 著. —武汉: 华中科技大学出版社, 2011.9

ISBN 978-7-5609-7146-9

I. 电… II. 陈… III. 电力系统-继电保护-文集 IV. TM77-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 102741 号

电力系统继电保护研究——文集

陈德树 著

责任编辑: 田 密

封面设计: 潘 群

责任校对: 朱 玢

责任监印: 张正林

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编: 430074 电话: (027)87557437

录 排: 武汉佳年华科技有限公司

印 刷: 华中科技大学印刷厂

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 20

字 数: 435 千字

版 次: 2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 55.00 元



本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

电力作为当今社会的主要能源,对国民经济的发展和人民生活水平的提高起着极其重要的作用。

自 1901 年第一代机电型感应式过流继电器在电力系统应用以来,继电保护已经经历了一个多世纪的发展,经历了机电式、整流式、晶体管式、集成电路式、微处理机式等不同的发展阶段。尽管其研究工作不断发展和完善,但是继电保护的基本原理并没有变,至今仍然应用于电力系统继电保护领域中。

我国对电力系统保护的研究开始于 20 世纪 50 年代初期。本书的作者也是从这个时候开始一直从事电力系统继电保护的研究与教学工作。本书是作者 50 年来在电力系统继电保护领域研究工作的集大成,也反映了我国继电保护研究及发展的一个侧面。它涉及继电保护各个主要领域的基本问题,包括其基本概念、基本分析方法、基本特性、新的解决方案以及对技术发展方向探讨等。虽然有些问题是多年前提出的,但由于是基本概念、基本理论和方法,对现在以及未来仍有其现实意义。

本书收集了迄至 2010 年 5 月为止,作者数十年来在电力系统继电保护方面研究的基础上执笔并发表的 34 篇文章。其内容包含 10 个方面,分别为电流、电压保护篇,距离保护篇,电流差动(包括变压器差动)保护篇,微机保护篇,发电机保护篇,自适应保护篇,继电保护算法篇,继电保护运行统计评价方法篇,电力系统安全稳定控制篇,特高压输电保护篇。本书提出以支接阻抗和支接电阻概念代替短路阻抗分析保护性能,用振荡阻抗特性分析系统振荡对保护的影响,区分差动保护灵敏度的两种概念,分析了现有统计分析评价继电保护方法的不确切性,提出了自适应保护的概念和应用,在接地阻抗继电器方面进行了系统的研究,提出采样值差动、虚拟三次谐波制动等保护技术。

回过头来审阅自己自 20 世纪 50 年代至今在电力系统继电保护方面执笔撰写过的 30 余篇论文,发现虽然在某些具体技术上有些过时,但在其基本概念、原理、方法方面还是能对今后从事这方面工作的人员具有一定的参考价值。

所录文章,皆是一孔之见,限于水平,错误在所难免,恳请指正。

作 者

2011 年 5 月于喻园

目 录

第 1 章 电流、电压保护	(1)
1.1 电力网络中电流、电压保护的应用	陈德树(1)
第 2 章 距离保护	(21)
2.1 简化距离保护装置研究	陈德树(21)
2.2 两端电源线路上三相补偿阻抗继电器的动作特性	陈德树(34)
2.3 支接阻抗动作特性与振荡阻抗动作特性	陈德树(48)
2.4 接地多相补偿阻抗元件的超越与方向性	陈德树(67)
2.5 阻抗继电器动作特性的基本动作方程	陈德树(78)
2.6 阻抗继电器过渡电阻动作特性的计算分析	陈德树(84)
2.7 TRCP(d)-1 程序及其应用——支接电阻动作特性(直接法)	陈德树(94)
2.8 I_0 极化的接地电抗继电器运行特性分析	陈德树(99)
2.9 Scheme for Accelerated Trip for Faults in the Second Zone of Protection of a Transmission Line	Chen Deshu, Liu Pei, Peng Hua, G. S. Hope, O. P. Malik(107)
2.10 High Impedance Fault (HIF) Protection of the Transmission Line	Chen Deshu, Zhang Zhe, Chen Wei, Yin Xianggen, Ma Tianhao(121)
第 3 章 差动保护	(128)
3.1 采样值电流差动微机保护的一些问题	陈德树, 马天皓, 刘沛, 张哲, 程利军, 唐平(128)
3.2 再谈采样值差动保护的一些问题	陈德树, 尹项根, 张哲(135)
3.3 故障分量差动保护与故障变化量差动保护	陈德树, 尹项根, 张哲, 陈卫, 文明浩(140)
3.4 差动保护运行动作特性的相量分析	陈德树, 陈卫, 尹项根, 张哲(144)
3.5 一周波动作电子式相差高频保护的初步研究	陈德树, 李鼎胜, 曾昭仁等(149)
3.6 非全相状态下相差动及幅相差动高频保护动作特性及纵向电压补偿	陈德树(155)
3.7 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护——原理与实践	陈德树, 尹项根, 张哲, 胡王峰(168)

3.8	The Analysis of Operation Characteristic of Transformer Differential Protection Based on Virtual Third Harmonic Theory	
	Chen Deshu, Chen Wei, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Hu Yafeng(175)	
3.9	发电机单元件横差保护的一些问题	
	陈德树, 尹项根, 张哲, 陈卫, 杨经超(180)	
第4章	微机保护	(183)
4.1	关于计算机继电保护的发展与展望	陈德树(183)
4.2	计算机继电保护技术的现状与展望	陈德树, 张之哲(193)
第5章	发电机保护	(206)
5.1	有限自适应式发电机转子一点接地保护	
	陈德树, 丁建义, 苏洪波, 文一彬, 尹项根(206)	
5.2	The Study of Generator Inter-fault Based on the Digital and Physical Simulation	
	Chen Deshu, Yin Xianggen, Zhang Zhe, Chen Wei, Xia Yangjun(211)	
5.3	大型水轮发电机的失励磁保护	陈德树, 任元, 樊俊, 周泰康(218)
第6章	自适应保护	(235)
6.1	Adaptive Principle in Protective Relaying	
	Chen Deshu, Liu Pei, Yin Xianggen, Gou Yong(235)	
第7章	继电保护算法	(243)
7.1	变数据窗傅里叶算法之研究	陈德树, 陈卫(243)
第8章	继电保护运行统计评价	(249)
8.1	继电保护运行状况评价方法的探讨	陈德树(249)
8.2	变压器保护运行状况评价方法初探	陈德树, 陈卫, 尹项根, 张哲(253)
第9章	电力系统安全稳定控制	(258)
9.1	大电网安全保护技术初探	陈德树(258)
第10章	特高压输电保护	(266)
10.1	特高压交流输电继电保护及相关问题	
	陈德树, 唐萃, 尹项根, 张哲, 陈卫, 郭贤珊(266)	
10.2	特高压线路故障切除的暂态过程研究	
	陈德树, 唐萃, 尹项根, 陈卫, 郭贤珊(270)	
第11章	发电机保护报告	(275)
11.1	大型水轮发电机失励磁保护动模试验研究报告	
	华中工学院等单位(275)	

第 1 章 电流、电压保护

1.1 电力网络中电流、电压保护的应用^①

电力系统由于自然的或人为的原因,可能发生故障或事故。设法使事故引起的损失减少到最低限度,以至消灭这些损失,这就是继电保护的主要任务。因此,保证高度的可靠性是考虑继电保护装置问题中一个极重要的原则。

目前电力系统继电保护装置的動作情况表明,在电力系统的事故中有一部分是人为的。其中不少的部分是由于继电保护装置的维护、试验、整定不当所引起的。提高继电保护可靠性的主要措施是提高运行维护人员的技术水平和责任心,以及尽可能地利用最简单的保护。

因此,继电保护导则第八节明确规定:“继电保护装置应当满足动作可靠性的要求,但这个要求应当使用最少数量的继电器、回路及接触点构成的简单接线系统来保证……”

为了尽可能地提高可靠性,减少维护、试验时的困难,还应该尽可能地利用简单的继电器来实现保护。

在各种保护原理中最简单的是电流保护,其次是电压保护。因此在电力系统的运行机关和设计机关采用了各种办法以提高电流、电压保护的效能和扩大其应用范围。

本文的目的是探讨电流、电压保护各种保护方式的效能。

1 电流、电压速切保护的种类

按保护原理,电流、电压速切保护主要有以下三种。

(1) 电流速切保护。过电流继电器按被保护对象末端故障时,流过继电器的最大短路电流整定,继电器在这种情况下不动作以保证选择性。

(2) 电压速切保护。低电压继电器按被保护对象末端故障时,加于低电压继电器上的电压整定,继电器在这种情况下不动作以保证选择性。

(3) 电流闭锁电压速切保护。它是使过电流继电器和低电压继电器的接点串联,互相闭锁来实现保护的。它的整定原则是:被保护对象末端故障时,最低限度有

^① 本文发表于 1957 年华中工学院学术报告会。

一个继电器(过电流或低电压继电器)不动作,以保证选择性。

除上述三种主要的保护方式外,还有一些综合使用的方式,一种是同时使用电流速切保护和低电压速切保护(称为伏安速切),二者接点并接,二者各自单独保证选择性。或者是电流速切保护和电流闭锁电压速切保护同时应用,或低电压速切保护与电流闭锁电压速切保护同时并用。按理论上说,还可以同时应用电流速切保护、低电压速切保护和电流闭锁电压速切保护,它们的接点都并接。应该说明,最后一种方式由于它的复杂性,实际没有得到应用。

2 电流速切保护的 protection 范围

继电保护导则规定,在计算保护的整定值时,短路电流可采用 $t=0$ 时的瞬时值。此时系统等值电势标么值可采用 1。当不考虑分支系数时,电流速切的启动值(标么值,以下同)为

$$I_{op} = K_{s,i} I_{f,max} \quad (1)$$

式中, $K_{s,i}$ ——电流速切保护所用的可靠系数,对于输电线路,采用 1.15~1.25;

$I_{f,max}$ ——被保护对象末端故障时的最大次过渡电流。

在辐射网络中以系统阻抗表示时,式(1)变为

$$I_{op} = K_{s,i} \frac{1}{Z'_{sys,i} + Z_l} \quad (2)$$

式中, $Z'_{sys,i}$ ——对该线路而言,考虑电流速切保护时所采用的系统最大运行方式下的系统等值阻抗标么值(数值最小);

Z_l ——被保护线段的阻抗标么值。

电流速切最小保护范围是在系统最小运行方式(对该保护而言)下,两相短路时的保护范围。单相短路不予考虑,它将由接地保护装置保护。此时,若在保护范围末端短路,则有

$$I_{f,p}^{(2)} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I_{f,p}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{Z''_{sys,i} + Z_p} \quad (3)$$

式中, $I_{f,p}^{(2)}$ ——保护范围末端金属性两相短路时的短路电流;

Z_p ——最小保护范围的阻抗标么值;

$Z''_{sys,i}$ ——对该线路而言,考虑电流速切保护时所采用的系统最小运行方式下的系统等值阻抗标么值(数值最大)。

在系统最小运行方式下,保护范围末端两相短路时,应该有 $I_{f,p}^{(2)} = I_{op}$ 。由式(2)及式(3)得

$$K_{s,i} \frac{1}{Z'_{sys,i} + Z_l} = \frac{0.866}{Z_p + Z''_{sys,i}}$$

简化得

$$L_{p,i}^{(2)} = \frac{Z_p}{Z_l} = \frac{0.866}{K_{s,i}} - \frac{Z'_{sys,i}}{Z_l} \left(\frac{Z''_{sys,i}}{Z'_{sys,i}} - \frac{0.866}{K_{s,i}} \right)$$

或

$$L_{p,i}^{(2)} = \frac{0.866}{K_{s,i}} - Z'_{sys,i} * \left(n_{sys,i} - \frac{0.866}{K_{s,i}} \right) \quad (4)$$

或写成

$$L_{p,i}^{(2)} = \frac{0.866}{K_{s,i}} (1 + Z'_{\text{sys},i*}) - Z'_{\text{sys},i*} n_{\text{sys},i} \quad (5)$$

式中, $Z'_{\text{sys},i*} = \frac{Z'_{\text{sys},i}}{Z_l}$ ——最大运行方式下系统阻抗与线路阻抗之比值;

$L_{p,i}^{(2)}$ ——两相短路时保护范围的相对值;

$n_{\text{sys},i} = \frac{Z''_{\text{sys},i}}{Z'_{\text{sys},i}}$ ——考虑电流速切保护时采用的系统阻抗最大值与最小值之比。

从式(4)及式(5)可见,当 $n_{\text{sys},i}$ 为常数时, $L_{p,i}^{(2)} = f(Z'_{\text{sys},i*})$ 为一直线,当 $Z'_{\text{sys},i*}$ 为常数时,则 $L_{p,i}^{(2)} = f(n_{\text{sys},i})$ 为一直线(见图1及图2)。

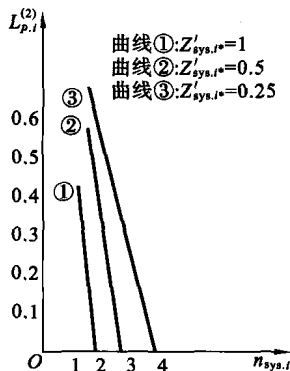


图1 $K_{s,i} = 1.2$ 时,各个 $Z'_{\text{sys},i*}$ 值下的 $L_{p,i}^{(2)} = f(n_{\text{sys},i})$ 特性

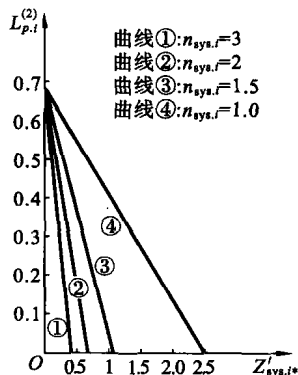


图2 $K_{s,i} = 1.2$ 时,各个 $n_{\text{sys},i}$ 值下的 $L_{p,i}^{(2)} = f(Z'_{\text{sys},i*})$ 特性

由图1及图2可见:电流速切两相短路极限的最小保护范围是72%,这只在无穷大母线上,即 $Z'_{\text{sys},i*} = 0$ 时才存在。 $Z'_{\text{sys},i*}$ 值越大,即系统电源越小或线路越短,则保护范围越短。同样, $n_{\text{sys},i}$ 值越大,即运行方式变化越大,则保护范围也越小。 $Z'_{\text{sys},i*}$ 和 $n_{\text{sys},i}$ 中,一个已经决定后,另一个超过某一定数值,则保护范围为零。

3 电压速切保护的保护区

与电流速切的整定情况相似,为了保证选择性,低电压速切的整定方法如下。

$$U_{\text{op}} = K_{s,u} u_{r,\min} = K_{s,u} \sqrt{3} I_{f,\min}^{(3)} Z_l \quad (6)$$

$$\text{或} \quad U_{\text{op}} = K_{s,u} \sqrt{3} \frac{Z_l}{Z_l + Z'_{\text{sys},u}} \quad (7)$$

式中, $Z'_{\text{sys},u}$ ——考虑电压速切保护时,对该线路而言,系统最小运行方式下的系统等值阻抗标么值;

U_{op} ——保护对象末端短路时的母线最小剩余线电压标么值;

$I_{f,\min}^{(3)}$ ——同上,最小运行方式下的三相短路电流标么值;

$K_{s,u}$ ——电压速切保护所用的可靠系数,小于1。

下面,我们进一步研究低电压速切保护的保护区。对低电压保护而言,最大运行方式时,其保护范围最小。因此,在保护范围末端三相短路时,有

$$U_{op} = U_f = \frac{\sqrt{3}Z_p}{Z_p + Z'_{sys,u}} \quad (8)$$

式中, Z_p ——保护范围最小值;

$Z'_{sys,u}$ ——对该线路而言,考虑电压速切时所采用的系统最大运行方式下的系统等值阻抗标么值;

U_{op} ——最大运行方式下,保护范围末端三相短路时母线的剩余线电压。

比较式(7)和式(8),得

$$K_{s,u} \sqrt{3} \frac{Z_l}{Z_l + Z'_{sys,u}} = \frac{\sqrt{3}Z_p}{Z_p + Z'_{sys,u}}$$

化简得

$$L_{p,u} = \frac{Z_p}{Z_l} = \frac{K_{s,u} Z'_{sys,u} *}{(1 - K_{s,u}) + Z'_{sys,u} * n_{sys,u}} \quad (9)$$

式中, $L_{p,u}$ ——低压速切保护的最小保护范围。

不难证明,当系统中正序阻抗等于负序阻抗时,两相短路的剩余电压和三相短路的剩余电压相等。因此无须考虑两相短路时的保护范围。

根据式(9)可得出保护范围特性如图3及图4所示。

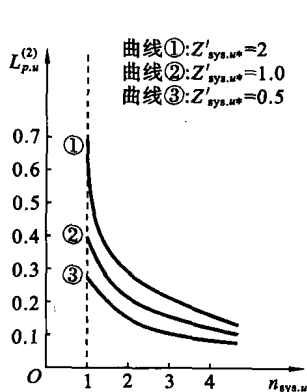


图3 $K_{s,u} = 0.75$ 时,各个 $Z'_{sys,u} *$ 值下的 $L_{p,u}^{(2)} = f(n_{sys,u})$ 特性

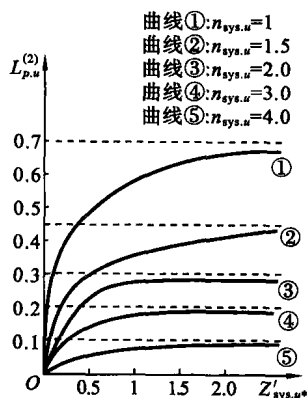


图4 $K_{s,u} = 0.75$ 时,各个 $n_{sys,u}$ 值下的 $L_{p,u}^{(2)} = f(Z'_{sys,u} *)$ 特性

由图3及图4可见,低电压速切,对于一种运行方式,或运行方式变化很小的线路,有很好的灵敏度。但运行方式改变增大时,灵敏度急剧减小。另一方面,系统阻抗越大,灵敏度越高,这恰和电流速切相反。应该说明,系统发生短路时,电压是会衰减的。因而电压速切保护的 protection 范围将比计算值增大一些。

4 电流闭锁电压速切保护的 protection 范围

电流闭锁电压速切保护的工作原理是使电流继电器和电压继电器的接点串接,互相闭锁。其整定条件是使保护对象末端故障时最低限度有一个接点不闭合。当被保护对象末端及其外部短路时,若短路电流已使电流继电器动作,则应保证此时低电压继电器不动作,即剩余电压高于继电器的动作电压,以公式表示如下:

$$U_{op} = \frac{\sqrt{3}I_{op}Z_l}{K_{s,b}} \quad (10)$$

式中, I_{op} ——电流继电器动作电流;

Z_l ——被保护线段阻抗;

$K_{s,b}$ ——可靠系数。

式(10)是保证选择性的必要条件。要决定 I_{op} 及 U_{op} 还必须考虑另一条件, 这就是灵敏度的条件。一种整定方法是首先保证过电流继电器的灵敏度, 即 $I_{op} \leq I_{f, \min}^{(2)}$ 。这是目前设计部门所采用的整定方法。另一种整定方法是所谓按“最好条件”整定, 即在最大运行方式下由低电压继电器来保证选择性, 即由它来决定保护范围的方法。相反, 在最小运行方式下则由电流继电器决定保护范围。并且令这两个保护范围大小相等(见附录 B)。

现进一步分析一下按“最好条件”整定电流闭锁电压速切时, 它的保护范围与网络参数的关系。

令 Z_p 为“最好条件”整定时的保护范围, 则在此保护范围末端故障时有下列关系:

$$U_p = U_{op} = \frac{\sqrt{3}Z_p}{Z_p + Z'_{sys}} \quad (11)$$

$$I_p^{(2)} = I_{op} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{Z_p + Z''_{sys}} \quad (12)$$

式中, U_p ——最大运行方式下, 保护范围末端故障时的剩余电压;

$I_p^{(2)}$ ——最小运行方式下, 保护范围末端两相短路时的短路电流。

将式(11)、式(12)代入式(10)得

$$\frac{Z_p}{Z_p + Z'_{sys}} = \frac{Z_l}{K_{s,b}} \cdot \frac{0.866}{Z_p + Z''_{sys}}$$

令 $L_{p,b} = \frac{Z_p}{Z_l}$, 将上式化简后得

$$L_{p,b}^2 + \left(Z'_{sys,b} n_{sys,b} - \frac{0.866}{K_{s,b}} \right) L_{p,b} - \frac{0.866}{K_{s,b}} Z'_{sys,b} = 0 \quad (13)$$

当 $n_{sys,b} = 1$ 时, 式(13)可写成

$$\left(L_{p,b} - \frac{0.866}{K_{s,b}} \right) (L_{p,b} + Z'_{sys,b}) = 0$$

即保护范围与 Z_l 无关, 并等于 $\frac{0.866}{K_{s,b}}$ 。当 $n_{sys,b} > 1$

时, $Z'_{sys,b}$ 越小, 则 $L_{p,b}$ 越大。在系统运行在较大运行方式和线路较长时, 电流闭锁电压速切保护的

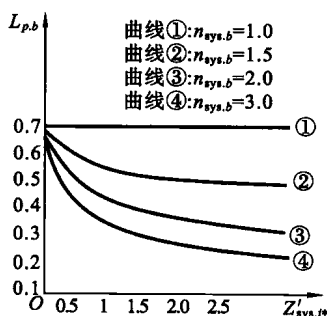


图5 $K_{s,b} = 1.2$ 时, 各个 $n_{sys,b}$ 值下的 $L_{p,b} = f(Z'_{sys,b})$ 特性

前面的分析证明,当保护对象末端短路,且 $I_f < I_{op}$ 时,按“最好条件”整定的电流闭锁电压速切的灵敏度是增加的。但此时电流元件及低电压元件的可靠系数下降。整套保护的可靠系数最低值(见附录 B)为

$$K_{s.b.min} = \frac{K_{s.b} - 1}{2} + 1 = \frac{1 + K_{s.b}}{2} \quad (14)$$

目前设计部门采用按 $I_{op} \leq I_{f.min}$ 的条件整定,似乎可以避免上述可靠系数下降的情况。但进一步分析证明,如果按 $I_{op} = I_{f.min}$ 这一条件整定,则可靠系数下降的情况同样不一定能避免。因为考虑到短路过程中短路电流的衰减,则 $I_f < I_{op}$ 的情况仍是存在的。

当 $K_{s.b}$ 采用 1.2 时,由式(14)得 $K_{s.b.min} = 1.1$ 。

若考虑电流衰减,电流继电器返回系数为 0.85,采用 $K_{s.b} = 1.3$,则 $K_{s.b.min} = 1.15$ 。此时很明显,保护是能保证选择性的。

5 各种速切保护的应用范围

速切保护的应用范围问题即在怎样的系统情况下,采用哪一种速切保护的问题。要解决这个问题,首先得解决如下两个问题:第一个问题是达到怎样的质量水平保护才可以采用,以什么指标为判断根据比较恰当?第二个问题是以什么函数来表征系统特性最恰当(这里研究的主要是开式网络)。速切保护质量水平无疑最恰当以被保护元件的相对保护范围 L_p 来表示。此外,也应当考虑两个辅助指标,即在被保护元件始端故障时的最小灵敏系数 $K_{sen.min}$,以及始端故障时的容许最大过渡电阻值 R_n 。

与速切保护有关的系统参数有三个: Z_l 、 Z'_{sys} 、 Z''_{sys} 。若以其中之一作为参考值,则其他两参数可以其相对值来表示。这样,系统参数就变为两个,这将使系统特性可以两个变数的关系式来表示。

Z_l 、 Z'_{sys} 、 Z''_{sys} 都可以作为参考值,但其中以 Z_l 为参考值最恰当,因 Z_l 在以后发展中是不变的,而 Z'_{sys} 、 Z''_{sys} 是会改变的。因此系统特性可以 $Z'_{sys*} = \frac{Z'_{sys}}{Z_l}$ 及 $Z''_{sys*} = \frac{Z''_{sys}}{Z_l}$ 来表示。下述的分析表明,当 $L_{p.min}$ 为一不变值时,可得出各种速切的 $Z''_{sys*} = f(Z'_{sys*})$ 为一直线。这对绘图及计算有最大的助益。但下述分析亦表明,以图表示能满足 $L_{p.min}$ 要求的 $Z''_{sys*} = f(Z'_{sys*})$ 特性曲线是不够清晰的。若以 $n_{sys} = \frac{Z''_{sys*}}{Z'_{sys*}}$ 代替 Z_{sys} 作为系统特性指标,则可得在 $L_{p.min}$ 不变时 $n_{sys} = f(Z'_{sys*})$ 为一倒数曲线。此时其特性图比较清晰易看。下面将以 $L_{p.min}$ 不变,进行各种速切的 $Z''_{sys*} = f(Z'_{sys*})$ 及 $n_{sys} = f(Z'_{sys*})$ 的特性分析,并加以统一比较。

(1) 电流速切保护。当 L_p 不变时,由式(5)得

$$n_{sys,i} \leq \frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} + \frac{\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} - L_{p.min}^{(2)}}{Z'_{sys,i*}} = \alpha_i + \frac{\beta_i}{Z'_{sys,i*}} \quad (15)$$

$$\text{或} \quad Z'_{\text{sys}, i*} \leq \frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} (1 + Z'_{\text{sys}, i*}) - L_{p, \min}^{(2)} \quad (16)$$

此处, $\beta_i = \alpha_i - L_{p, \min}^{(2)}$, 按定义有 $n_{\text{sys}} \geq 1$, $Z'_{\text{sys}*} > Z'_{\text{sys}*}$ 。式(15)相应的特性如图6所示, 当 $Z'_{\text{sys}*} \rightarrow \infty$ 时须 $n_{\text{sys}} \leq \frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}}$, 但因 $n_{\text{sys}} \geq 1$, 故只在 $n_{\text{sys}} \geq 1$ 或 $Z'_{\text{sys}, i*} \leq Z'_{\text{sys}, i* (1)}$ 的情况下才有可能采用电流速切保护。按式(15), 当 $n_{\text{sys}, i} = 1$ 时, 有

$$Z'_{\text{sys}, i*} = Z'_{\text{sys}, i* (1)} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} - L_{p, \min}^{(2)}}{1 - \frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}}} \quad (17)$$

$L_{p, \min}^{(2)}$ 越大, 容许的 $Z'_{\text{sys}, i* (1)}$ 值越小, 即系统容量要大(见图6), 而 $L_{p, \min}^{(2)}$ 最大值为 $\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}}$ 。

(2) 电压速切保护。当 L_p 不变时, 由式(9)得

$$1 \leq n_{\text{sys}, u} = \frac{K_{s,u}}{L_{p, \min}} - \frac{1 - K_{s,u}}{Z'_{\text{sys}, u*}} = \alpha_u + \frac{\beta_u}{Z'_{\text{sys}, u*}} \quad (18)$$

$$\text{或} \quad Z'_{\text{sys}, u*} \leq Z'_{\text{sys}, u*} = \frac{K_{s,u}}{L_{p, \min}} \cdot Z'_{\text{sys}, u*} - (1 - K_{s,u}) \quad (19)$$

令 $\alpha_u = \frac{K_{s,u}}{L_{p, \min}}$, 则

$$\beta_u = \alpha_u L_{p, \min} - 1$$

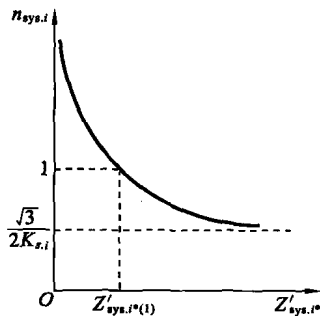


图6 $n_{\text{sys}, i} = f(Z'_{\text{sys}, i*})$ 的特性图

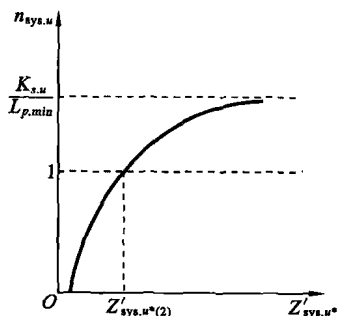


图7 $n_{\text{sys}, u} = f(Z'_{\text{sys}, u*})$ 的特性图

$n_{\text{sys}, u} = f(Z'_{\text{sys}, u*})$ 的特性如图7所示。当 $Z'_{\text{sys}, u*} \rightarrow \infty$ 时, $n_{\text{sys}, u} \approx \frac{K_{s,u}}{L_{p, \min}}$ 。因要求 $n_{\text{sys}, u} \geq 1$, 故只有 $L_{p, u} \leq K_{s,u}$, 才能采用低电压速切保护。

当 $\frac{K_{s,u}}{L_{p, \min}} > 1$ 时, 由图7可见, 必须使 $Z'_{\text{sys}, u*} > Z_{\text{sys}, u* (2)}$ 才能满足 $L_{p, \min}$ 的要求。当 $n_{\text{sys}, u} = 1$ 时, 有

$$Z_{\text{sys}, u* (2)} = \frac{1 - K_{s,u}}{K_{s,u} - L_{p, \min}} \cdot L_{p, \min} \quad (20)$$

与电流速切相反, 当 $L_{p, \min}$ 越大时, $Z_{\text{sys}, u* (2)}$ 值将迅速增大, 即电压速切保护的适用范

围迅速减小。当 $L_{p, \min} \rightarrow K_{s, u}$ 时, $Z_{\text{sys}, u*} (2) \rightarrow \infty$, 即不能采用。当 $K_{s, u}$ 减小时亦有同样结果。换言之, $L_{p, \min}$ 的最大值为 $K_{s, u}$ 。

(3) 电流闭锁电压速切保护。当 L_p 不变时, 由式(13)得

$$1 \leq n_{\text{sys}, b} = \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}L_{p, \min}} \cdot \frac{\frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}} - L_{p, \min}}{Z'_{\text{sys}, b*}} = \alpha_b + \frac{\beta_b}{Z'_{\text{sys}, b*}} \quad (21)$$

或

$$Z'_{\text{sys}, b*} \leq Z'_{\text{sys}, b*} = \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}L_{p, \min}} \cdot Z'_{\text{sys}, b*} + \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}} - L_{p, \min} \quad (22)$$

$$\beta_b = (\alpha_b - 1)L_{p, \min}$$

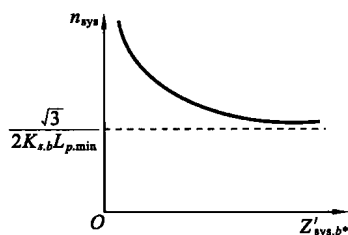


图 8 $n_{\text{sys}} = f(Z'_{\text{sys}, b*})$ 的特性图

当 $Z'_{\text{sys}, b*} \rightarrow \infty$ 时, 须 $n_{\text{sys}, b} \approx \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}L_{p, \min}}$ 。比较式(15)和式(21)或比较图 6 和图 8 可见, 电流速切保护的 $n_{\text{sys}, i}$ 下限值与电流闭锁电压速切保护的 $n_{\text{sys}, b}$ 下限值之比为

$$\frac{n_{\text{sys}, i}}{n_{\text{sys}, b}} = \frac{K_{s, b}L_{p, \min}}{K_{s, i}}$$

因 $K_{s, b} \leq \frac{K_{s, i}}{K_b}$, 而 K_b 一般大于 0.85, 当 $L_{p, \min} \leq K_b$ 时, $K_{s, i} > K_{s, b}L_{p, \min}$, 即在各种系统特性情况下 $n_{\text{sys}, b} \geq n_{\text{sys}, i}$, 即电流闭锁电压速切保护的应用范围都大于电流速切保护的。

此外, 当 $L_{p, \min} = \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}}$ 时, 式(21)变成 $n_{\text{sys}, b} = 1$ 的一直线。当 $L_{p, \min} > \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}}$ 时, $\alpha_b < 1$, β_b 为一负数。故 $n_{\text{sys}} = f(Z'_{\text{sys}, b*})$ 的特性在 $n_{\text{sys}, b} = 1$ 的直线之下, 即不可能存在。因此, $L_{p, \min}$ 的最大值为 $\frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}}$ 。因 $K_{s, b}$ 一般大于 $K_{s, i}$, 故此最大值将小于电流速切之 $L_{p, \min}$ 的最大值。

(4) 同时使用电压速切保护与电流速切保护。此时电流速切将保护运行方式中较大的情况, 电压速切则保护较小的情况。为分析方便起见, 可假定电流速切所保护的运行情况中的最小运行情况等于电压速切保护所保护的运行方式中的最大运行情况, 即令

$$Z''_{\text{sys}, i*} = Z'_{\text{sys}, u*}$$

然而应指出, 在实际系统中, 运行情况的变化不是连续的。此时可令 $Z''_{\text{sys}, i*} < Z'_{\text{sys}, u*}$, 即表示在 $Z''_{\text{sys}, i*}$ 与 $Z'_{\text{sys}, u*}$ 之间的运行情况不可能出现, 固而可不予考虑。这样所达的保护应用范围将较以 $Z''_{\text{sys}, i*} = Z'_{\text{sys}, u*}$ 的保护应用范围为大。在以后分析几种速切保护同时应用的特性时, 也将以运行方式是连续变化的这一前提出发进行分析。

由式(9)可得

$$Z''_{\text{sys}, u*} = Z'_{\text{sys}, u*} n_{\text{sys}, u} = \frac{K_{s, u} Z'_{\text{sys}, u*}}{L_{p, \min}} - (1 - K_{s, u})$$

因为

$$Z'_{\text{sys}, u*} = Z'_{\text{sys}, i*}$$

又由式(5)得

$$Z''_{\text{sys}, i*} = \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, i}} (1 + Z'_{\text{sys}, i*}) - L_{p, \min}$$

故得

$$Z''_{\text{sys}, u*} = (1 + Z'_{\text{sys}, i*}) \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, i}} \cdot \frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}} - 1$$

同时使用电压速切保护与电流速切保护时,其 $n_{\text{sys}} = f(Z_{\text{sys}})$ 特性为

$$n_{\text{sys}(i+u)} \leq \frac{Z''_{\text{sys}, u*}}{Z'_{\text{sys}, i*}} = \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, i}} \frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2K_{s, i}} \frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}} - 1 \right) \frac{1}{Z'_{\text{sys}, i*}} = \alpha_{(i+u)} + \frac{\beta_{(i+u)}}{Z'_{\text{sys}, i*}} \quad (23)$$

将式(23)与式(15)、式(21)相比较,有 $\alpha_{i+u} = \frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}} \alpha_i = \frac{K_{s, u}}{K_{s, i}} K_{s, b} \alpha_b$ 。一般而言, $\alpha_{i+u} < \alpha_b$, 与 α_i 相较则 $\alpha_{(i+u)}$ 取决于 $\frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}}$ 大于或小于 1。

此外,当 $\beta_{(i+u)} < 0$, 即 $L_{p, \min} > \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, i}} K_{s, u}$ 时,不能同时使用电压速切保护与电流速切保护。

按式(23)有

$$\beta_{(i+u)} = \alpha_{(i+u)} - 1$$

(5) 同时使用电流闭锁电压速切保护与电压速切保护。此时电流闭锁电压速切保护将保护运行方式中较大的情况,电压速切保护则保护较小的运行情况。假定运行方式的变化是连续的,此时

$$Z'_{\text{sys}, b*} = Z'_{\text{sys}, u}$$

同上,由式(9)及式(13)得

$$n_{\text{sys}(b+u)} \leq \frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}} \cdot \frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}} + \frac{\frac{\sqrt{3}}{2K_{s, b}} \cdot \frac{K_{s, u}}{L_{p, \min}} - 1}{Z'_{\text{sys}, b*}} = \alpha_{(b+u)} + \frac{\beta_{(b+u)}}{Z'_{\text{sys}, b*}} \quad (24)$$

$$\beta_{(b+u)} = \alpha_{(b+u)} L_{p, \min} - 1$$

(6) 同时使用电流闭锁电压速切保护与电流速切保护。此时前者将保护较小的运行情况,而后者保护较大的运行情况。同样假定运行方式的变化是连续的,此时

$$Z'_{\text{sys}, b*} = Z'_{\text{sys}, i*}$$

由式(13)及式(5)可得

$$n_{\text{sys}(b+i)} \leq \frac{3}{4K_{s, b} K_{s, i} L_{p, \min}} + \left(\frac{3}{4K_{s, b} K_{s, i} L_{p, \min}} - L_{p, \min} \right) \frac{1}{Z'_{\text{sys}, i*}} = \alpha_{(b+i)} + \frac{\beta_{(b+i)}}{Z'_{\text{sys}, i*}} \quad (25)$$

$$\beta_{(b+i)} = \alpha_{(b+i)} - L_{p, \min}$$

(7) 同时使用电流闭锁电压速切保护、电流速切保护与电压速切保护。此时以

电流速切保护较大的运行情况,电压速切保护较小的运行情况,而电流闭锁电压速切则保护二者之间的运行情况。同样亦假定运行方式的变化是连续的,此时

$$Z'_{\text{sys}(b+u)*} = Z''_{\text{sys}, i*} \quad \text{或} \quad Z''_{\text{sys}(b+i)*} = Z'_{\text{sys}, u*}$$

由式(15)、式(18)、式(24)、式(25)可求得

$$n_{\text{sys}(i+b+u)} \leq \frac{3K_{s,u}}{4K_{s,b}K_{s,i}L_{p,\min}^2} + \left(\frac{3K_{s,u}}{4K_{s,b}K_{s,i}L_{p,\min}^2} - 1 \right) \frac{1}{Z'_{\text{sys}, i*}} = \alpha_{(u+b+i)} + \frac{\beta_{(u+b+i)}}{Z'_{\text{sys}, i*}} \quad (26)$$

$$\beta_{(u+b+i)} = \alpha_{(u+b+i)} - 1$$

(8) 在采用电压元件的保护方式中还要考虑一个限制条件,即动作电压不能过低,整定电压过低时一方面很难得到这种继电器,另一方面考虑到电弧的影响,也不能采用过低的动作电压。因此,亦可利用上述原理,根据电压继电器的整定公式,得出在什么系统情况下才能采用电压元件。因为电流闭锁电压速切中电压元件的动作值必定大于电压速切的动作电压(否则其灵敏度较电压速切为低时必不会采用)。因此可只根据电压速切的整定公式考虑。由此可得

$$U_{\text{op}} = K_{s,u} \frac{Z_l}{Z''_{\text{sys}, r*} + Z_l} \geq U_{\text{op}, \min} \quad (27)$$

由此,可得

$$Z''_{\text{sys}, r*} = \frac{Z''_{\text{sys}, r}}{Z_l} \leq \frac{(K_{s,u} - U_{\text{op}, \min})}{U_{\text{op}, \min}}$$

$$\text{或} \quad n_{\text{sys}, r} = \frac{Z''_{\text{sys}, r*}}{Z'_{\text{sys}, r*}} = \frac{(K_{s,u} - U_{\text{op}, \min})}{U_{\text{op}, \min}} \frac{1}{Z'_{\text{sys}, r*}} = \alpha_r + \frac{\beta_r}{Z'_{\text{sys}, r*}} \quad (28)$$

式中

$$\alpha_r = 0, \quad \beta_r = \frac{K_{s,u}}{U_{\text{op}, \min}} - 1$$

其中,下标“r”表示“继电器”。

从上述分析可见,要保证一定的保护范围时,系统必须满足 $n_{\text{sys}} \leq f(Z'_{\text{sys}*})$ 或 $Z'_{\text{sys}*} \leq f(Z'_{\text{sys}*})$ 特性曲线的要求,而且各种速切的特性曲线都有共通的形式

$$n_{\text{sys}} = \alpha + \frac{\beta}{Z'_{\text{sys}*}} \quad (29)$$

与

$$Z'_{\text{sys}*} = \alpha Z'_{\text{sys}*} + \beta \quad (30)$$

式(29)对应的特性曲线为一倒数曲线,其渐近线为一水平线与一铅直线。垂轴渐近线为 $Z'_{\text{sys}*} = 0$,即坐标的纵轴。而水平渐近线则为 $n_{\text{sys}} = \alpha$,即平行于横轴的一直线。 α, β 值越大则 n_{sys} 值越大,即速切的适用范围越大。分析式(30)亦有同样的结果,只是式(30)转换了一个函数变成直线而已。按定义, $n_{\text{sys}} \geq 1$ 为有效,否则无意义。

α, β 是 $K_{s,u}, K_{s,i}, K_{s,b}, L_{p,\min}$ 等的函数。当 $K_{s,u}$ 等参数为已知时, α, β 值是一常数,与系统无关。但 α, β 值视不同的速切保护方式而异(见表1)。从表1亦可见, $\beta = f(\alpha)$ 为一扩散的函数, β 随 α 增大而增大。

表1 不同的速切保护方式对应的 α 、 β 值

速切保护方式	α 值	β 值
i	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} - L_{p,\min} = \alpha_i - L_{p,\min}$
u	$\frac{K_{s,u}}{L_{p,\min}}$	$K_{s,u} - 1 = \alpha_u L_{p,\min} - 1$
δ	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,b}L_{p,\min}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,b}} - L_{p,\min} = (\alpha_b - 1)L_{p,\min}$
$i+u$	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} \frac{k_{s,u}}{L_{p,\min}} = \alpha_i \alpha_u$	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,i}} \frac{k_{s,u}}{L_{p,\min}} - 1 = \alpha_{(i+u)} - 1$
$b+u$	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,b}} \frac{k_{s,u}}{L_{p,\min}^2} = \alpha_b \alpha_u$	$\frac{\sqrt{3}}{2K_{s,b}} \frac{k_{s,u}}{L_{p,\min}^2} - 1 = \alpha_{(b+u)} L_{p,\min} - 1$
$b+i$	$\frac{3}{4K_{s,b}K_{s,i}L_{p,\min}} = \alpha_b \alpha_i$	$\frac{3}{4K_{s,b}K_{s,i}L_{p,\min}} - L_{p,\min} = \alpha_{(b+i)} - L_{p,\min}$
$u+b+i$	$\frac{3K_{s,u}}{4K_{s,b}K_{s,i}L_{p,\min}^2} = \alpha_b \alpha_i \alpha_u$	$\frac{3K_{s,u}}{4K_{s,b}K_{s,i}L_{p,\min}^2} - 1 = \alpha_{(b+i+u)} - 1$
低电压下限要求的系统特性	0	$\frac{K_{s,u}}{U_{op,\min}} - 1$

注:表中所用符号 i 表示电流速切; u 表示电压速切; b 表示电流闭锁电压速切;“+”号表示同时应用,即相加之各保护方式的接点并联。

当取 $K_{s,i}=1.2$; $K_{s,u}=0.7$; $K_b=1.3$; $L_{p,\min}=0.4$ 时,各种速切的 α 、 β 值见表2。

又 $L_{p,\min}=0.5$; $L_{p,\min}=0.7$; $L_{p,\min}=0.6$ 时,各种速切的 α 、 β 值见表3、表4及表5。

表2 $K_{s,i}=1.2$; $K_{s,u}=0.7$; $K_b=1.3$; $L_{p,\min}=0.4$ 时的 α 、 β 值

	i	u	b	$i+u$	$b+u$	$b+i$	$b+i+u$
α	0.72	1.75	2.06	1.25	3.6	1.48	2.6
β	0.32	-0.30	0.424	0.25	0.44	1.08	1.6

表3 $K_{s,i}=1.2$; $K_{s,u}=0.7$; $K_b=1.3$; $L_{p,\min}=0.5$ 时的 α 、 β 值

	i	u	b	$i+u$	$b+u$	$b+i$	$b+i+u$
α	0.72	1.4	1.34	1.01	1.86	0.96	1.34
β	0.22	-0.30	0.17	0.01	-0.07	0.46	0.34

表4 $K_{s,i}=1.2$; $K_{s,u}=0.7$; $K_b=1.3$; $L_{p,\min}=0.7$ 时的 α 、 β 值

	i	u	b	$i+u$	$b+u$	$b+i$	$b+i+u$
α	0.72	1 *	0.95 *	0.27 *	0.95 *	0.685 *	0.685 *
β	0.02	-0.30	-0.035	-0.28	-0.335	-0.015	-0.315