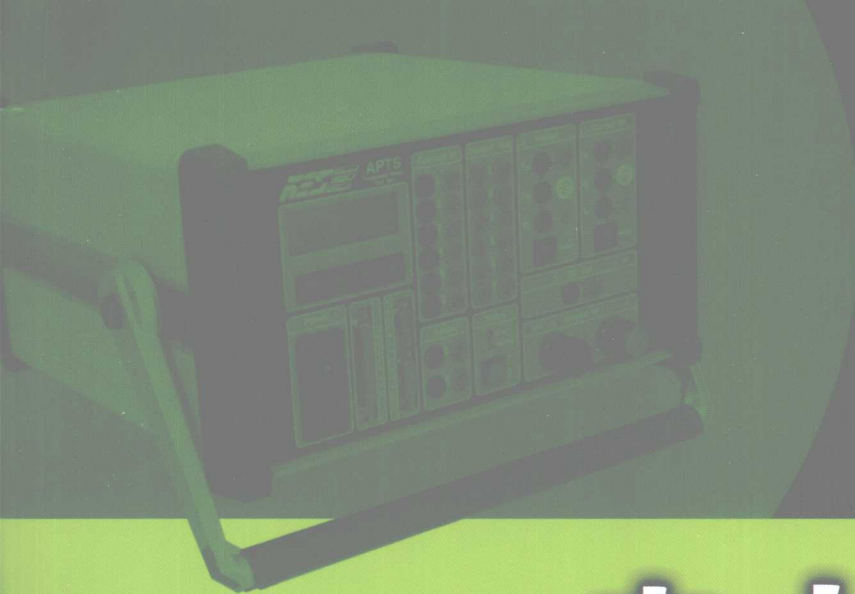
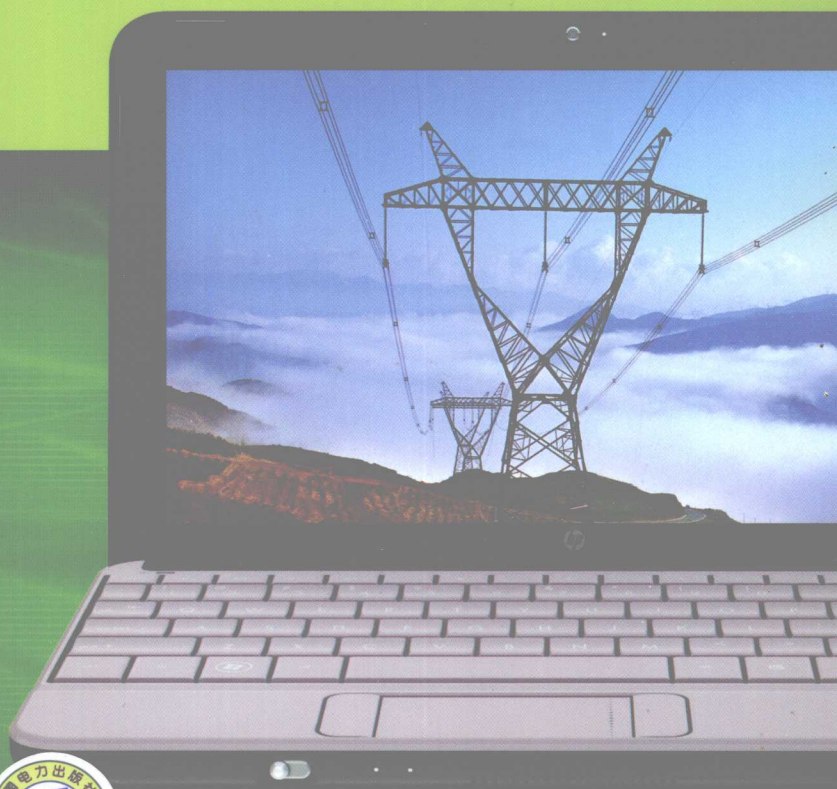




电力系统 微机保护测试技术

孟恒信 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



电力系统 微机保护测试技术

孟恒信 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要是针对从事电力系统继电保护设备现场调试的技术人员而编写的。全书共分7章,第1~3章主要介绍电力系统的基本概念和电力系统的基本故障特征,第4章主要介绍电网常用保护的构成原理及模拟试验方法,第5章主要介绍小接地电流系统单相接地故障及模拟试验方法,第6章主要介绍发电机保护的构成原理及试验方法,第7章主要介绍电力系统故障录波图识别与分析。

全书紧密结合现场实际,介绍了电力系统故障的基本特征,以及各种保护的最基本构成原理,在此基础上,重点介绍了各种保护的模拟试验机理,以及利用微机保护校验仪手动模拟试验方法,可进一步提高继电保护运行管理及维护人员调试理论水平,摆脱目前的试验方法完全依靠厂家调试大纲的被动局面。

本书可作为继电保护运行管理及维护人员的专业现场调试、技术比武的培训教材,也可作为大专院校继电保护及相关专业的教学参考书或选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统微机保护测试技术/孟恒信编著. —北京:
中国电力出版社,2009
ISBN 978-7-5083-8696-6

I. 电… II. 孟… III. 计算机应用-电力系统-继
电保护装置 IV. TM774-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 054059 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年7月第一版 2009年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.5印张 209千字

印数 0001—3000册 定价 20.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

电力系统微机保护测试技术

继电保护装置是电力系统的重要组成部分,对保证系统安全稳定运行起着非常重要的作用。在系统发生故障时与断路器共同实现切除故障设备,确保系统的安全稳定运行,继电保护装置的不正确动作会给系统造成严重的危害。继电保护装置除了在故障和不正常运行的短时间内动作外,长期是不动作的,因而被喻为电力系统的无声卫士。继电保护装置投入运行以后一般没有任何反应,装置的某些缺陷是不能及时被发现的,从而成为故障时不正确动作的隐患。机械型保护装置尤其是这样,微机型保护装置虽然有强大的自检功能,使得保护装置性能有了很大提高,但装置的有些缺陷还是不能通过自检发现的,例如装置的电流、电压测量误差、出口继电器的动作行为等。因此,继电保护装置在现场投运以前和运行一段时间后,必须对其进行详细的检验。2006年,国家颁布DL/T 995—2006《继电保护和电网安全自动装置检验规程》规定了继电保护装置详细的检验项目。

根据继电保护在系统中的重要作用和技术特点,对继电保护提出了四项基本要求:安全性、选择性、快速性和灵敏性。继电保护装置的现场检验是保证四性的最后把关检验项目。现场检验包括对保护装置性能、功能的静态检验和装置外部回路的接线正确性的检查和传动。为了配合DL/T 995—2006的贯彻实施,提高继电保护装置现场检验水平和检验质量,编者从分析电力系统的简单故障入手,对继电保护装置中较复杂的检验项目进行了分析、汇总,编写了本书。

随着微机型高压线路继电保护及大型机组继电保护装置的大量应用,对继电保护装置的要求也在不断提高。以移相器、自耦调压器、升流器、滑杆电阻、指示仪表等传统设备组成的试验仪器已经远远不能满足继电保护试验的需要。微机型保护测试仪因需而生,进而也带来了试验理念上的更新,使得试验过程几乎可以完全真实模拟电力系统的实际故障过程,可以比较方便地检验继电保护装置的各项技术性能、测量精度及逻辑功能。目前,电力系统各发电单位和广大电力用户都广泛采用微机保护测试仪对保护装置进行检验。为了便于现场调试人员正确使用微机型继电保护测试仪完成保护继电器的检验,本书在介绍继电器的检验方法时,除重点介绍继电器的检验机理外,还较详细地介绍了微机型继电保护测试仪输入及模拟控制方法。

目前,电力系统继电保护及故障分析的教科书及相关丛书很多,讲得也非常详细,但大多是偏重理论,能直接指导现场试验研究的书较少。本书编者从指导继电保护现场调试人员顺利完成继电保护装置的相关性能试验出发,将电力系统故障的基本特征、保

护继电器的核心构成原理及检验调试机理进行了有机结合,力图使读者在较短时间内对继电保护现场调试有一个系统的认识,缩短学校新毕业学生理论与实践相结合的过程。

因此,本书讲述的故障分析内容并非电力系统的故障分析的全部内容,仅从继电保护装置的基本构成原理和现场模拟试验的角度出发,讲述电力系统故障分析最基本的内容,也是最核心的内容。本书讲述保护的基本原理也不是继电保护原理的全部内容,仅是从现场检验调试的角度出发,介绍了保护的最核心原理,保护的详细工作原理及逻辑关系还需参考具体检验装置的技术说明书。

本书是在编者多年现场检验调试工作经验积累的基础上,通过对不同保护基本工作原理及试验方法的剖析后编写的,不仅介绍了具体的试验方法,而且介绍了试验方法的试验机理,希望能对读者的试验能力有所帮助,能尽快成为现场调试的技术骨干,提高继电保护现场试验维护队伍的技术素质。

华北电力大学黄少锋教授对本书的全部内容进行了详细的审校,提出了很多重要的修改建议,在此表示最衷心诚挚的感谢。

本书第1~3章主要介绍电力系统故障的基本特征,第4章主要介绍电网常用保护继电器的试验方法,第5章主要介绍小接地电流系统单相接地故障及模拟试验,第6章主要介绍发电机保护的构成原理及试验方法,第7章主要介绍电力系统故障录波图识别与分析。

由于编者长期从事电力试验研究工作,写书经验不足,所以,衷心地希望读者阅读此书后能提出宝贵的修改意见和建议,使本书能尽快成为继电保护现场试验维护人员的有益工具。

编者

目 录

电力系统微机保护测试技术

前言

■ 第 1 章 电力系统故障分析的基本概念	1
1.1 标幺制的基本概念	1
1.2 电气相量与时域电气量的对应关系	2
1.3 对称分量法	5
■ 第 2 章 中性点接地系统简单故障分析	9
2.1 中性点接地系统单相接地故障	9
2.2 中性点接地系统两相短路故障	13
2.3 中性点接地系统两相短路接地故障	16
2.4 中性点接地系统三相短路	19
2.5 发生短路故障期间系统的各点电压分布	20
■ 第 3 章 变压器两侧故障电流电压传变关系	24
3.1 变压器两侧正序和负序对称电流之间的关系	24
3.2 YN 侧单相接地故障变压器两侧电流、电压的关系	26
3.3 YN 侧两相短路故障变压器两侧电流、电压的关系	27
3.4 Δ 侧两相短路故障变压器两侧电流、电压的关系	28
3.5 变压器断相故障分析	29
■ 第 4 章 电网继电保护常用试验方法	36
4.1 微机型继电保护试验仪简介	36
4.2 中性点接地系统简单故障模拟方法	38
4.3 接地阻抗继电器的试验方法	40
4.4 相间阻抗继电器的试验方法	47
4.5 微机电流方向保护检验方法	51
4.6 微机纵联线路保护检验方法	56
4.7 微机变压器电流差动保护检验方法	62
4.8 微机高压电抗器保护检验方法	71
4.9 母线保护及模拟试验	75
■ 第 5 章 小接地电流系统单相接地故障及模拟试验	83
5.1 不接地系统正常运行时的电气特点	83

5.2	不接地系统单相接地故障的特点	83
5.3	中性点不接地系统单相接地的保护方式	86
5.4	中性点经消弧线圈接地系统单相接地的特点及保护方式	87
5.5	中性点经电阻接地系统单相接地的特点及保护方式	88
■ 第6章	发电机保护及模拟试验方法	90
6.1	同步发电机的故障及不正常工况	90
6.2	发电机内部短路保护及模拟试验	92
6.3	发电机内部匝间短路及模拟试验	94
6.4	发电机定子接地故障及模拟试验	99
6.5	发电机失磁保护及模拟试验	106
6.6	发电机失步保护及模拟试验	120
6.7	发电机的其他保护及模拟试验	125
6.8	发电机启动试验	125
■ 第7章	电力系统故障录波图识别与分析	130
7.1	故障录波图的基本成分	131
7.2	在录波图中读取准确事件时间	133
7.3	典型录波图分析	135
7.4	电力系统非正弦电气波形	137
参考文献		143

第 1 章

电力系统故障分析的基本概念

在电力系统的故障中,仅在一处发生短路称为简单故障。它通常分为两类:一类为横向故障,包括单相短路接地 $K^{(1)}$ 、两相短路 $K^{(2)}$ 、两相短路接地故障 $K^{(1,1)}$ 及三相短路故障 $K^{(3)}$ 四种类型。其中, $K^{(1)}$ 、 $K^{(2)}$ 、 $K^{(1,1)}$ 为简单横向不对称故障, $K^{(3)}$ 为简单横向对称故障,这种故障发生在系统中某一点的一些相之间和相对地之间,是处于网络三相支路的横向,故称为横向不对称故障。另一类是发生在网络沿三相支路的纵向,称为纵向不对称故障,包括一相断线和两相断线两种基本类型。为了便于介绍电力系统故障分析的相关内容,本章先介绍几个相关的基本概念。

1.1 标幺制的基本概念

在电力系统故障计算中,电流、电压、阻抗、功率等物理量,一般都不用它们的实际有名值表示,而习惯于用相对值(或标幺值)表示。各物理量均用标幺值来表示的相对单位制就是标幺制。标幺值的定义为

$$\text{标幺值} = \frac{\text{实际有名值(任意单位)}}{\text{基准值(与实际有名值同单位)}}$$

由标幺值的定义可以看出,标幺值是一个没有量纲的数值,对于同一个实际有名值,基准值选取得不同,其标幺值不同,即标幺值具有相对性。因此说某个量的标幺值时,必须同时说明它们的基准值,否则这个量的标幺值没有实际意义。

应用标幺值表示有三大优点:

(1) 用标幺值表示参数,能使参数中体现质量,使得比较参数的优劣有了一个合理的基础,便于判断设备的性能、参数和运行状态是否正常。

(2) 可以使计算得到简化。只要适当选取基准值,可使许多物理量的标幺值处在同一范围内。用有名值表示数值不相等的量,在标幺制中可能出现数值相等的情况,例如线电压标幺值等于相电压标幺值。

(3) 采用标幺值能够简化计算公式。如实际频率与额定频率相等时,频率标幺值与角频率标幺值 ($f_* = \omega_* = 1$),可使有些公式得到简化。

1.2 电气量与时域电气量的对应关系

1.2.1 电气量与时域电气量的对应关系

分析电力系统各种电气特征时,人们常用各种电气相量来表示,如三相电压量常用 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 来表示,三相电流量常用 $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ 来表示,三相电动势量常用 $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ 来表示等。

电气相量只是一种分析工具,实际系统的各种电气量并非是相量表示形式,当用示波器测量仪器观察某些电气量时,一般看到的都是时域空间的电气量,如电流、电压的波形。而在分析电力系统的某些电气特征时,则往往用电气相量来表示,这是由于用电气相量分析,可以使某些量的电气特征更直观,更便于理解。而时域空间电气量在着重分析电气量的变化过程时,更直观也更能说明问题。因此,对于某一特定的电气相量,根据应用场合不同,有时用电气相量来表示,有时用时域空间电气量(即波形图)来表示,它们之间有着一一对应的关系。为了使读者更好的理解下面各章节的内容,下面以三相电压为例,简单介绍一下它们之间的对应关系,如图 1-1 所示。

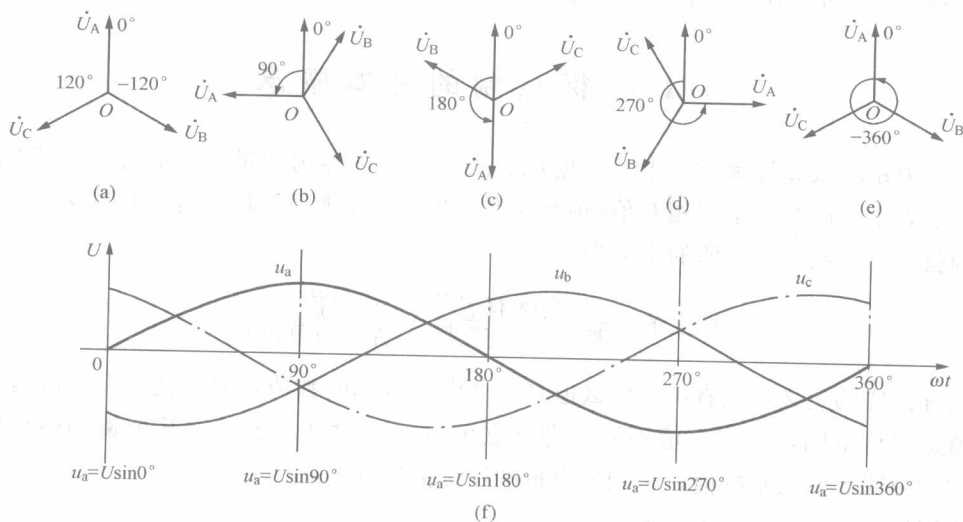


图 1-1 三相电压相量与时域三相电压的对应关系

(a) $\omega t=0$ 时电压相量; (b) $\omega t=\frac{\pi}{2}$ 时电压相量; (c) $\omega t=\pi$ 时电压相量; (d) $\omega t=\frac{3}{2}\pi$ 时电压相量;

(e) $\omega t=2\pi$ 时电压相量; (f) 时域空间三相电压波形

用电气相量或时域电气量表示同一电压量时,首先要规定参考量或起始点,一般三相电压的电气相量参考量,常以 A 相电压相量为参考,时域表示的三相对称正弦电压常以 A 相电压由 0 变正为电压量的起始时刻,即 $t=0$ 的时刻。当然也可以另行规定参考量和起始时刻,但一旦规定了,在同一分析计算过程中,则不能改变。

图 1-1(a)示出了以 A 相电压相量为参考量的三相对称电压相量,若设定 A 相电压向上为参考相位,并用 $\dot{U}_A = \dot{U}e^{j0^\circ}$ 表示。则 B 相电压为滞后 120° (需要逆时针旋转 120° 才能

到达 A 相电压的位置), 可用 $\dot{U}_B = \dot{U}e^{-j120^\circ}$ 表示, C 相电压为超前 120° (表明 A 相电压到达参考点前, C 相电压提前 120° 到达过参考点位置), 可用 $\dot{U}_C = \dot{U}e^{+j120^\circ}$ 表示。

对应时域表示的三相对称正弦电压, 如图 1-1(f) 所示, 对应 A 相电压参考点的时间起点, $\omega t = 0$, 三相电压可表示为

$$\begin{aligned} u_a &= U \sin \omega t = U \sin 0^\circ \\ u_b &= U \sin (\omega t - 120^\circ) = U \sin (-120^\circ) \\ u_c &= U \sin (\omega t - 240^\circ) = U \sin (-240^\circ) \end{aligned}$$

式中: U 为三相对称正弦电压最大幅值; ω 为角频率; t 为时间。

由于三相电压量是随着时间不断变化的, 当电压 u_a 经过 $\omega t = \pi/2$ 周期后, A 相电压相量 $\dot{U}_A$ 逆时针旋转 90° , 同理 B 相和 C 相电压也逆时针旋转 90° , 如图 1-1(b) 所示。记为

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}e^{j90^\circ} \\ \dot{U}_B &= \dot{U}e^{-j120^\circ+j90^\circ} = \dot{U}e^{-j30^\circ} \\ \dot{U}_C &= \dot{U}e^{j120^\circ+j90^\circ} = \dot{U}e^{j210^\circ} \end{aligned}$$

对应时域表示的三相对称正弦电压到达图 1-1(f) 的 90° 处, 三相对称正弦电压变为

$$\begin{aligned} u_a &= U \sin 90^\circ \\ u_b &= U \sin (90^\circ - 120^\circ) = U \sin (-30^\circ) \\ u_c &= U \sin (90^\circ + 120^\circ) = U \sin 210^\circ \end{aligned}$$

A 相电压达到正的最大值, B、C 电压为负的电压最大值的 $1/2$ 。

当电压 u_a 再经过 $\pi/2$ 周期后 $\omega t = \pi$, A 相电压相量 $\dot{U}_A$ 逆时针旋转 180° , 同理 B 相和 C 相电压也逆时针旋转 180° , 如图 1-1(c) 所示。记为

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}e^{j180^\circ} \\ \dot{U}_B &= \dot{U}e^{-j120^\circ+j180^\circ} = \dot{U}e^{j60^\circ} \\ \dot{U}_C &= \dot{U}e^{j120^\circ+j180^\circ} = \dot{U}e^{j300^\circ} \end{aligned}$$

对应时域表示的三相对称正弦电压到达图 1-1(f) 的 180° 处, 三相对称正弦电压变为

$$\begin{aligned} u_a &= U \sin 180^\circ \\ u_b &= U \sin (180^\circ - 120^\circ) = U \sin 60^\circ \\ u_c &= U \sin (180^\circ + 120^\circ) = U \sin 300^\circ \end{aligned}$$

A 相电压为 0, B 电压为正的 0.866 倍电压最大值。C 电压为负的 0.866 倍电压最大值, 以此类推, 如图 1-1(d)、(e) 所示。

可以看出, 用相量图表示的电压相量与时域表示的电压量有着——对应的关系, 当设定时域起始时刻和相量的基准参考相量后, 它们表示的电气特征是一样的。即 $u_a = U \sin 0^\circ$ 对应于 $\dot{U}e^{j0^\circ}$, $u_a = U \sin 90^\circ$ 对应于 $\dot{U}e^{j90^\circ}$ 等。建立了这种——对应的相互关系以后, 就可以用相量来分析电力系统的各种电气特征了。

前面以电压量为例作了说明, 对于其他量, 如电流、电动势等, 也同样可以这样表示。

1.2.2 电气相量的加减运算

由于现在讲的相量就是数学里学的矢量, 它有大小和方向, 可以运用数学方法及几

何作图方法进行加、减、乘、除等运算。

下面利用几何作图的方法，简单介绍一下计算两个相量的相加和相减运算。

如要计算电压相量 $\dot{U}_a$ 和 $\dot{U}_b$ 相加运算，可将电压相量 $\dot{U}_b$ 平行移到电压相量 $\dot{U}_a$ 的顶端，再从 A 相电压起点到平移后 B 相电压的顶点作连线即可，如图 1-2 所示。

若要计算两个相量相减运算，如 $\dot{U}_a - \dot{U}_b$ ，可仍按相加运算，先将电压相量 $\dot{U}_b$ 反向，再平行移到电压相量 $\dot{U}_a$ 的顶端，如图 1-3 所示。用几何作图法完成相量的加减运算以后，还可以再用平面几何知识计算出运算后的模值及角度，在这里不再详述。

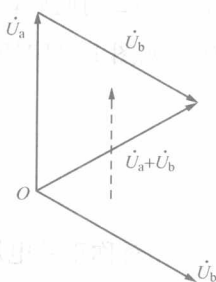


图 1-2 $\dot{U}_a$ 相量与 $\dot{U}_b$ 相量相加

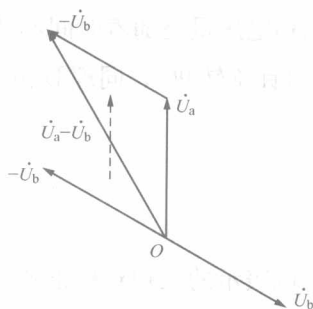


图 1-3 $\dot{U}_a$ 相量与 $\dot{U}_b$ 相量相减

1.2.3 时域波形图与相量图对应关系实例

为了更清楚地理解时域波形与相量图的关系，再用如图 1-4 所示的故障录波图为例作一说明。该录波图是某 220kV 变电站的一条 220kV 线路 C 相单相接地故障时的实际故障录波图，是一张时域的电流、电压及开关量录波图。各录波曲线的含义如图 1-4 所示。可以看出，发生故障后 C 相电压降低，C 相电流升高，从时间轴上看，C 相电压过 0 变正的瞬间，C 相电流从负的最大向 0 变化，大约经过 4.2ms（工频 $4.2 \times \frac{360^\circ}{20} = 75.6^\circ$ ）才过 0 变正，即 C 相电流滞后 C 相电压 75.6° ，画成相量图，如图 1-5 所示。

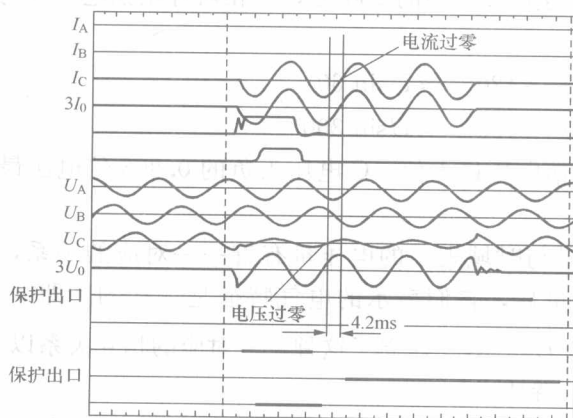


图 1-4 C 相单相接地故障录波图

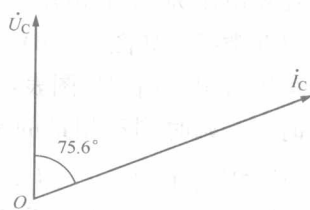


图 1-5 C 相单相接地故障时的电压电流相量图

1.3 对称分量法

1.3.1 对称分量法的基本原理

在分析三相短路时,由于三相电路是对称的,只需分析一相就可以了,没必要对三相都分析。但是,在分析系统发生不对称短路时,由于电路的对称性遭到破坏,网络中出现了三相不对称的电压和电流,对称电路变成了不对称电路,不能只取一相进行分析计算,而直接地去解这种不对称电路是相当复杂的。于是人们发现了一种通过求解三组不同对称三相量来合成不对称三相量的方法。在线性电路中可以应用叠加原理,对这三组对称分量分别按对称三相电路去解,然后将结果叠加起来,从而揭示不对称三相电路的解答,这种方法就称为对称分量法。

任意的不对称三相量只能分成三组对称分量,它们分别定义为:

(1)正序分量。三相量的正序分量大小相等,彼此相位互差 120° ,且与系统在正常对称运行情况下的相序相同(A、B、C三相为顺时针顺序),如图 1-6(a)所示。

(2)负序分量。三相量的负序分量大小相等,彼此相位互差 120° ,且与系统在正常对称运行情况下的相序相反(A、B、C三相为逆时针顺序),如图 1-6(b)所示。

(3)零序分量。三相量的零序分量大小相等,彼此相位相同,如图 1-6(c)所示。

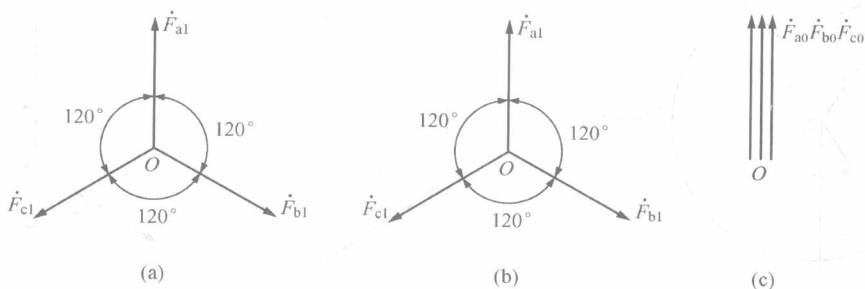


图 1-6 对称分量

(a) 正序分量; (b) 负序分量; (c) 零序分量

1.3.2 对称分量法的运算符号

在对称系统中,一个相量可以通过将另一个相量旋转一定的角度来表示,如对于正序系统 $\dot{F}_{b1}$ 相量,可以用 $\dot{F}_{a1}$ 相量顺时针旋转 120° 来表示。 $\dot{F}_{c1}$ 相量可以用 $\dot{F}_{a1}$ 相量顺时针旋转 240° 表示。即

$$\dot{F}_{b1} = a^2 \dot{F}_{a1}$$

$$\dot{F}_{c1} = a \dot{F}_{a1}$$

式中: a 为运算符号。

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = \cos 240^\circ + j \sin 240^\circ = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

显然 a 和 a^2 有如下关系

$$a + a^2 + 1 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + 1 = 0$$

为了便于记忆,将运算符号用图 1-7 所示的单位圆表示,横坐标为实部,纵坐标为虚部。

a 顶点在坐标系的第二象限,角度为 120° ,所以 a 的实部为负值,等于 $-\frac{1}{2}$,虚部为正值,等于 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。 a^2 顶点在坐标系的第三象限,角度为 240° ,所以, a^2 的实部也为负值,等于 $-\frac{1}{2}$,虚部为负值,等于 $-\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。

若一个相量乘以 a ,它的物理含义是将该相量逆时针旋转一个 120° 。如:在三相对称系统中,将正序量 $\dot{F}_{b1}$ 乘以 $a = e^{j120^\circ}$ 就等于 $\dot{F}_{a1}$,如图 1-8 所示。

若一个相量乘以 a^2 ,它的物理含义是将该相量逆时针旋转一个 240° 。如:在三相对称系统中,将正序量 $\dot{F}_{c1}$ 乘以一个 $a^2 = e^{j240^\circ}$ 就等于 $\dot{F}_{a1}$,如图 1-9 所示。

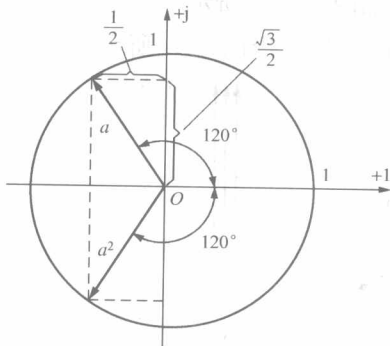


图 1-7 对称分量法的运算图形符号

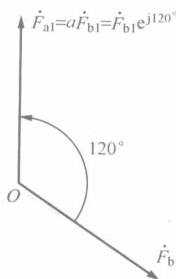


图 1-8 a 的物理含义

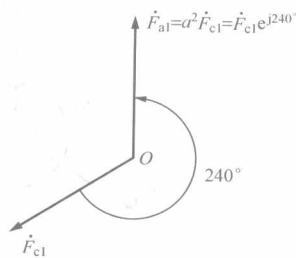


图 1-9 a^2 的物理含义

1.3.3 对称分量法的应用条件

对称分量法是根据叠加原理构成的,因此,它适用于线性系统,即系统中参数不随电流、电压的大小而变化,电路中各元件的阻抗是恒定的,电流与电压之间为线性关系。

在电力系统中,输电线路、母线等元件可以看成是线性系统,但是发电机、变压器等元件就不属于线性系统。

1.3.4 对称分量分析法的应用

为了从三相不对称电气量中获取各序对称电气量,需要分别利用对称分量的表达式逐一获得。对任意一组三相电气量都可以利用如下公式求取它们的对称序分量,即

$$\dot{F}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{F}_a + a\dot{F}_b + a^2\dot{F}_c)$$

$$\dot{F}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{F}_a + a^2\dot{F}_b + a\dot{F}_c)$$

$$\dot{F}_{a1} = \frac{1}{3} (\dot{F}_a + \dot{F}_b + \dot{F}_c)$$

(1) 如要获取三相系统的正序分量 $\dot{F}_{a1}$ 可按如下方法得到。

1) 将 b 相电气量逆时针旋转 120° ，即将 b 相电气量乘以 $a = e^{j120^\circ}$ 。

2) 将 c 相电气量逆时针旋转 240° ，即将 c 相电气量乘以 $a = e^{j240^\circ}$ 。

3) 将完成旋转后的三个电气量相加，再除以 3 就可得到正序分量 $\dot{F}_{a1}$ 。

(2) 如要获取三相系统的负序分量 $\dot{F}_{a2}$ 可按如下方法得到。

1) 将 b 相电气量逆时针旋转 240° ，即将 b 相电气量乘以 $a = e^{j240^\circ}$ 。

2) 将 c 相电气量逆时针旋转 120° ，即将 c 相电气量乘以 $a = e^{j120^\circ}$ 。

3) 将完成旋转后的三个电气量相加，再除以 3 就可得到负序分量 $\dot{F}_{a2}$ 。

(3) 如要获取三相系统的零序分量 $\dot{F}_{a0}$ 可按如下方法得到。将 a 相电气量与 b 相电气量和 c 相电气量相加，再除以 3 就可得到零序分量 $\dot{F}_{a0}$ 。

为了进一步理解上述公式的正确性及求取各序分量的方法，下面用一种较通俗的方法作一说明，即假定从一个已知的对称三相电气量中获取各序电气量。

已知待分析的是一组三相对称正序量，按上述方法可以得到如图 1-10(a)~(c) 所示的结果，即求取的三相正序量与原正序量相等 ($\dot{F}_{a1} = \dot{F}_a$)，三相负序量等于 0 ($\dot{F}_{a2} = 0$)，三相零序量等于 0 ($\dot{F}_{a0} = 0$)。

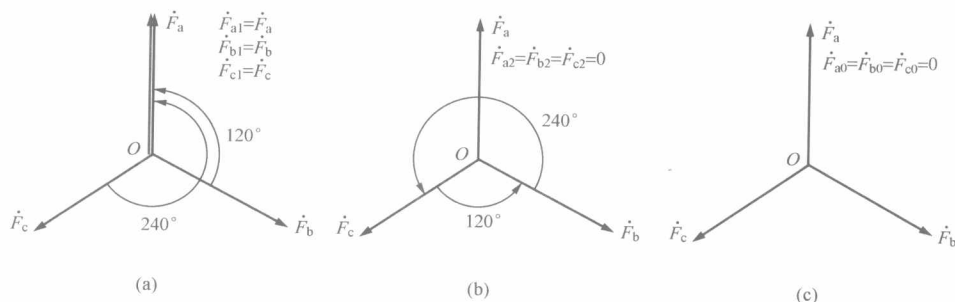


图 1-10 信号源为三相正序量求解各序量

(a) 求解正序量 $\dot{F}_{a1}$; (b) 求解负序量 $\dot{F}_{a2}$; (c) 求解零序量 $\dot{F}_{a0}$

已知待分析的是一组三相对称负序量，可得到如图 1-11 所示求解结果。即三相正序量等于 0 ($\dot{F}_{a1} = 0$)，三相负序量与原负序量相等 ($\dot{F}_{a2} = \dot{F}_a$)，三相零序量等于 0 ($\dot{F}_{a0} = 0$)。

同理可以求已知信号源为零序三相量时，求解的正序和负序量为 0，零序量等于相量。

因此，可以知道一个正序对称三相系统只含有三相对称正序量，负序和零序量为 0；一个负序对称三相系统只含有三相对称负序量，正序和零序量为 0；一个零序三相系统只含零序量，正序和负序量为 0。同时可以看出，利用上述表达式求解一组待分析三相电气量的正序、负序及零序分量的方法正确。

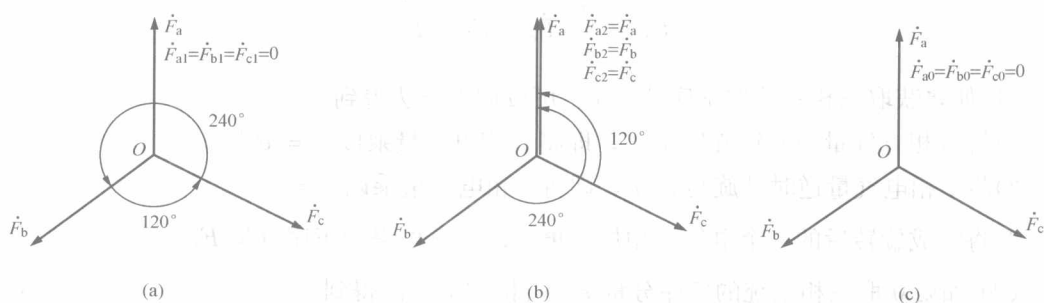


图 1-11 信号源为三相负序量求解各序量

(a) 求解正序量 $\dot{F}_{a1}$; (b) 求解负序量 $\dot{F}_{a2}$; (c) 求解零序量 $\dot{F}_{a0}$

通过上面的分析，可以看出对称分量法的应用价值，它的实际应用价值主要在于后面章节的不对称三相电气量分析，在这里主要使读者对对称分量法有一个初步的了解。

第 2 章

中性点接地系统简单故障分析

本章主要讨论中性点接地系统常见的典型横向故障,包括单相短路接地故障 $K^{(1)}$ 、两相短路故障 $K^{(2)}$ 、两相短路接地故障 $K^{(1,1)}$ 及三相短路故障 $K^{(3)}$ 四种类型。为了使读者更清晰地理解简单横向故障最基本的电气特征,为现场事故分析处理和模拟试验打基础,在分析推导过程中作了一定的简化,即假定故障前线路空载,不考虑负荷电流的影响;故障类型为纯金属性故障,不考虑过渡电阻的影响。实际上有负荷电流时,只需要在下面计算出的故障量上再叠加负荷分量即可,而分析有过渡电阻时的电气特征则是在金属短路基础上需进一步研究的内容。

电力系统简单故障分析的目的主要是通过分析计算,求解出保护安装处的电流和电压特征。因为只有了解了保护安装处的电流和电压特征,才能更好地理解保护的构成原理,也才能更好地完成对保护设备的模拟试验,更好地完成对电网事故的分析处理工作。

求解方法分解析法和复合序网法两种,一般都是通过故障时故障点的最基本电气特征,即边界条件,先用解析法求解出故障点各序电流和序电压的基本特征,再利用它们之间的相互关系建立复合序网,用序网法对故障点和保护安装处电气特征作进一步的分析,最终得到保护安装处的电流、电压特征。

利用对称分量法分析一个三相不对称系统时,每一序分量一定含有它的序电流、序电压和序阻抗,从而也就组成该序的一个序网,由于各序网是由同一三相系统分解而来,它们之间一定存在相互关联的关系,利用它们之间的关联关系可以将各序网连在一起,从而构成一个网络,即为复合序网。

2.1 中性点接地系统单相接地故障

2.1.1 单相接地故障边界条件

以线路正方向发生 A 相金属性接地故障为例,故障点的边界条件为接地故障相电压等于 0,即 $\dot{U}_A = 0$; 非故障相电流等于 0,即 $\dot{I}_B = \dot{I}_C = 0$,如图 2-1 (a) 所示。

(1) 故障点的各序电流。计算如下

$$\dot{I}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{3}\dot{I}_A$$

$$\dot{I}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = \frac{1}{3} \dot{I}_A$$

可以看出,故障点的正序、负序、零序电流相等,即

$$\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A0} = \frac{1}{3} \dot{I}_A$$

(2) 故障点电压各序分量。根据故障点的 A 对地相电压等于 0 的边界条件可得, $\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = \dot{U}_A = 0$, 即三序电压之和等于 0。

2.1.2 故障点的序网图

由边界条件得到的故障点三序电流和三序电压相互关系,可以指明三序网络在故障点的连接方式。因三序电流相等 ($\dot{I}_{A1} = \dot{I}_{A2} = \dot{I}_{A0}$), 所以它们的正序、负序及零序网应串联; 同时因三序电压之和等于 0 ($\dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0} = 0$), 故三序网串联后应短接。画出它们的连接关系,即复合序网图,如图 2-1 (b) 所示。

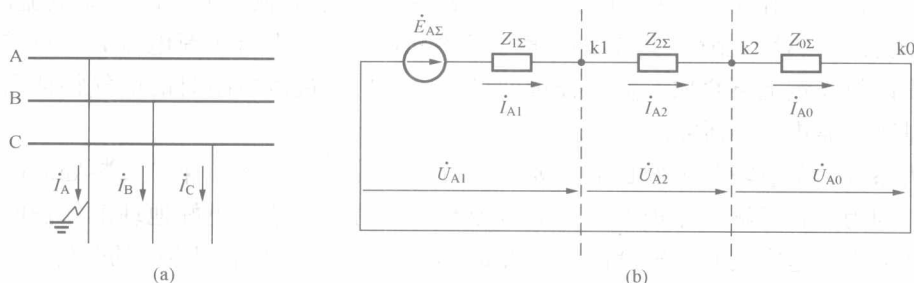


图 2-1 A 相单相接地故障复合序网

(a) A 相金属接地故障时边界条件; (b) A 相金属接地故障时复合序网图

其中, $Z_{1\Sigma}$ 、 $Z_{2\Sigma}$ 、 $Z_{0\Sigma}$ 分别为从故障点看进去的等值正序、负序和零序阻抗, $\dot{E}_{\Delta\Sigma}$ 为从故障点看进去的等值电源电动势。各序网的规定正方向如图 2-1 (b) 所示。

故障点的正序电压为

$$\dot{U}_{A1} = \dot{E}_{\Delta\Sigma} - \dot{I}_{A1} Z_{1\Sigma} = \dot{I}_{A1} (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})$$

故障点的负序电压为

$$\dot{U}_{A2} = -\dot{I}_{A1} Z_{2\Sigma}$$

故障点的零序电压为

$$\dot{U}_{A0} = -\dot{I}_{A1} Z_{0\Sigma}$$

由于假定故障前系统是空载,故障电流是由等效电动势形成的,因此,故障点的正序电流为

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{E}_{\Delta\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$$

2.1.3 故障点的各序电流、电压相量

由于故障点的 A 相的三序电流相等,因此可以先画出 A 相的三序电流,再根据序电