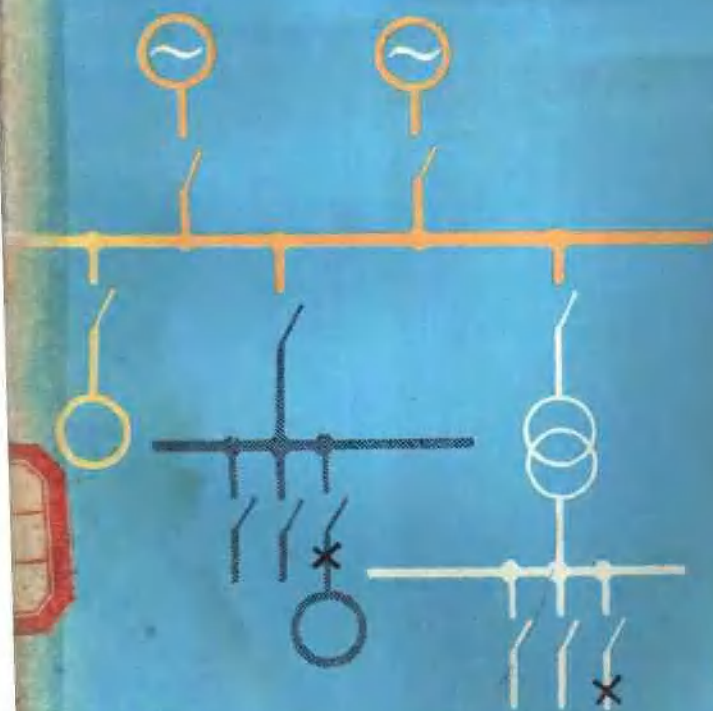


船舶交流电力系统的 短路电流



吳忠林 編譯

國防工業出版社

船舶交流电力系统的 短路电流

吴忠林 编译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系根据国外有关资料编译而成。介绍了船舶电力系统短路电流的一般特性，交流发电机和感应电动机短路电流的计算方法，着重论述了船舶交流电力系统的短路电流计算方法，并对目前采用的各种短路电流计算方法进行了分析比较。书中有计算范例和理论计算值与实机试验结果的比较。书后附录中还简要地介绍了直流电力系统的短路电流计算方法，列出了一个计算短路电流的源程序，收集了国产电机、电缆、变压器的计算短路电流的原始数据。

本书可供从事船舶电力系统设计人员和从事短路电流研究的科技工作者参阅，亦可供船电专业的师生参阅。

船舶交流电力系统的短路电流

吴忠林 编译

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9 228千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷 印数：0,001—1,800册

统一书号：15034·2464 定价：1.15元

前 言

船舶交流电力系统与陆上输配电系统相比，有很大的不同，其主要特征是：主电源以发电机为主，电力负载种类很多，但负载比例较大的是感应电动机，而且电动机也是短路电流的供给源；电源电压低，馈电线阻抗对短路电流影响也较大，所以，在计算短路电流时，要考虑该阻抗的影响。

船舶电力系统发生短路时，产生比正常过载状态大很多倍的短路电流，影响船舶正常航运甚至危及安全。在船舶电力系统设计时，应该选择合适的保护装置，保证在发生短路时，能立即有效地切除短路故障，把故障限制在最小范围内。所以，必须重视短路电流计算。

目前，尚不具备充分理论依据的短路电流计算方法，国际上广泛采用 IEC（国际电工委员会）计算方法，日本采用电气协同研究会推荐的精密计算方法和近似计算方法。这些方法在我国也广为采用。

本书收集整理了短路电流的一般特性、交流发电机和感应电动机的短路电流计算方法，论述了船舶交流电力系统短路电流的计算。为了加深理解所述内容，在某些章节中引用了计算范例；对各种计算方法也进行了概略的介绍和比较，并引用了实机试验结果与计算结果的分析。

由于目前船上直流电力系统还在采用，所以在附录中简要地介绍了关于直流电力系统短路电流的计算方法；列出了一个计算短路电流源程序，并收集了国产电机、电缆、变压器的计算短路电流的原始数据，供参考。

编译本书的目的在于：为从事短路电流研究的同志提供一些

资料，以期引起对船舶电力系统短路电流计算问题的重视，促进这方面研究工作的开展，以适应船舶自动化发展的需要。

本书编译定稿后，刘文山同志帮助进行了校审，夏阳同志协助对计算短路电流源程序上机进行了实机运算。在此，谨向他们以及其他给予帮助的同志表示衷心感谢。

由于水平有限，关于资料的收集和编译、内容的取舍和论述等，均有不当之处，缺点和错误在所难免，恳求同志们批评指正。

编译者

目 录

第一章 概述	1
1.1 船舶交流电力系统	1
1.2 短路的一般概念	1
1.3 短路计算的意义和目的	2
第二章 交流电路的短路电流	6
2.1 简单三相交流电路突然短路的瞬态过程	6
2.2 三相交流电路的短路电流	17
第三章 交流发电机的短路电流	23
3.1 线间短路电流	23
3.2 他励交流发电机空载时三相突然短路	25
3.3 他励交流发电机负载时三相突然短路	28
3.4 IEC 计算式	32
3.5 他励交流发电机三相突然短路电流近似算法	36
3.6 自励复激交流发电机空载时三相突然短路	40
3.7 自励交流发电机负载时三相突然短路	48
第四章 感应电动机的短路电流	55
4.1 短路电流的计算公式	55
4.2 短路电流的特性	61
4.3 根据计算实例对各计算方法的比较	74
4.4 电动机常数计算	79
第五章 船舶交流电力系统的短路电流	84
5.1 船舶电力系统的短路电流计算	84
5.2 短路点选择	85
5.3 汇流排处短路时短路电流计算	86
5.4 馈电线端短路时短路电流计算	88
5.5 变压器副边短路时短路电流计算	96
5.6 船内电动机组的平均特性	98
5.7 IEC 算法	109
5.8 交流电力系统短路电流实用算法 (一)	135
5.9 交流电力系统短路电流实用算法 (二)	143

5.10	美国海军标准计算法	156
5.11	交流电力系统短路电流简易计算法	162
5.12	劳氏船级社简易短路电流计算法	170
第六章 船舶交流电力系统短路电流各种计算方法及其特征比较 188		
6.1	IEC 计算方法 (A方法)	188
6.2	等效发电机方法 (B方法)	192
6.3	日本电气协同研究会精密计算方法 (C方法)	198
6.4	阻抗百分比方法 (D方法)	204
6.5	图解方法 (E方法)	206
6.6	美国海军标准计算方法 (F方法)	210
6.7	各种计算方法的特征综述	214
6.8	典型船舶短路电流计算值比较	216
6.9	实机试验值和各种计算方法求得的短路电流值比较	220
6.10	各种计算方法的分析	233
第七章 短路电流与保护装置 234		
7.1	断路器的选择	235
7.2	按 IEC 第157-1号出版物推荐的短路定额来选择断路器	242
7.3	汇流排的选择与校验	244
附录 247		
一、船舶直流电力系统的短路计算 247		
二、计算交流电力系统短路电流源程序 (利用 TQ-16 电子计算机) 263		
三、计算短路电流的原始数据附表 269		
表3-1	国产船用同步发电机参数表	270
表3-2	国产电动机特性参数表	272
表3-3	国产 2、4、6、8 极电动机特性平均参数表	276
表3-4	国产船用电缆的电阻和电抗值	278
表3-5	国产船用变压器参数	279
表3-6	电缆与母线接触电阻	279
表3-7	日本乙丙橡胶绝缘船用电缆的电导体电阻和阻抗(参考)	280
表3-8	西德三芯船用电缆的电阻值、电抗值	281
主要参考文献 284		

第一章 概 述

1.1 船舶交流电力系统

船舶电力系统，是指由一个或几个在统一监控之下运行的船舶电源及与之相连接的船舶电网组成的，以向负载供电的整体。它是船上电能产生、传输、分配和消耗等全部装置、网络的总称。交流电力系统，是指选用交流电的船舶电力系统。所以，船舶电力系统应包括船舶电站（电源与配电装置）、电缆和用电设备等。

船舶电网，是指介于船舶电源和用电设备之间的传输、分配电能的全部配电装置和网络的总称⁽¹⁾。

关于船舶电力系统的设计，应该包括：发电机组的功率和数量的选择、发电机的电压调整、发电机的并联运行、配电系统的设计以及电力系统的保护等。

船舶电力系统的设计，必须保证它具有最大的可靠性，确保连续供电，以保证船舶正常安全地航运。为此，必须认真考虑船舶发电机的保护和船舶电网的保护。在船舶发电机和船舶电网的保护中，短路保护是十分重要的，所以，必须重视短路电流计算。诚然，在保护装置的选择中，短路电流也是重要因素。

1.2 短路的一般概念

关于短路，现在有几种解释。一种是指“电路两点之间用小电阻连接，或电路的绝缘破坏而形成阻值非常小的回路”；另一种是指“有电位差的两点，用阻值非常小的导线连接起来”；再一种是指“将某一支路两端直接连通，使两端电压为零”。不论哪一种解释，其含义都是明确的。

通常所说的船舶电力系统的短路，是指电机、电器和电缆的绝缘老化，或受机械损伤，或带电部分发生异常接触等原因造成的短路。其故障点通过很大的电流，它与正常状态产生的过载电流是完全不同的危险状态^[2]。

电力系统在发生短路故障时，系统的总阻抗减小（减小的程度视故障点在系统中的位置而异），因而，各支路的电流也较正常运行情况增大很多倍，而系统内各点的电压也将下降很多，在故障点附近更为严重。

在发生短路的地点，通常产生一种阻抗，该阻抗是由电弧的电阻和短路电流从一相至另一相或从一相至地所经过的元件的阻抗所组成。假如预想准确地计算这种阻抗，实际上是不可能的。因为电弧电阻是随电流的大小和电弧的长短而变化，而且变化的范围是很大的，难以准确地估计。但在某些情况下，该阻抗的数值可能很小，实际上可以忽略不计，这种短路叫做“金属性短路”^[3]。

在其他条件相同时，金属性短路的电流值较有中间阻抗存在时为大。因此，欲求出最大可能的短路电流值，应从最坏的情况出发，即假定在故障点没有任何阻抗，所以一般都注重讨论金属性短路的情况。本书也仅仅研究金属性短路。

最简单的短路是三相短路，即三相同时在一点短路。假如三相电路每相所经过的中间阻抗是相等的，则正常情况下三相短路也应该是对称的，此时，仅是电流增大、电压降低而已。其电流和电压之间的相位差与短路电路的电抗和电阻的比值有关，通常较正常情况大些。其他短路，都是不对称的。

1.3 短路计算的意义和目的

由于船舶电力系统与陆上高压电力系统电压等级及环境条件不同，因此，两者有很大差别，这就决定了船舶电力系统的短路电流计算具有某些特点。

船舶电站与陆上电站相比,前者可以看作是一个流动的电站,一般都以发电机作为主电源。电网内负载的种类很多,但其主要负载是感应电动机,如我国自行设计建造的1000吨级沿海货轮,电动机就达30多台,在航行状态,电动机负载占整个负载的74%;而在装卸货状态,电动机负载可达整个负载的84%左右。另外,在船舶电力系统中,电动机的容量与发电机容量可相比拟,这与陆上电站大不相同。当船舶电力系统短路时,虽然电源不再供电给感应电动机,但旋转机械没有立即停止,由于惯性的作用,感应电动机继续旋转,此时与转子导体交链的磁通不能立即消失,这就出现感应电动机产生感应电势向短路系统供电的情况。所以在计算短路电流时,不能忽视感应电动机的影响。换句话说,感应电动机也是短路电流的供给源。

船舶电力系统的另一特点是:它与陆上高压系统相比,其电压低得很多,故外电路的阻抗对短路电流影响很大。因此,在计算短路电流时,对外电路的阻抗应予适当的重视。

众所周知,船舶电力系统正常运行状况被破坏,大多数是由于短路故障所引起的。产生这种故障的原因,主要有:

1. 电气设备载流部分的绝缘被破坏,这是由于绝缘的自然老化和机械损伤所引起的。
2. 战斗舰艇中电气设备受到严重冲击而造成短路故障。
3. 误操作引起的短路。

船舶电力系统一旦发生短路,将出现比正常电流大许多倍的短路电流。比如无锡电机厂生产的THF-400/10型交流同步发电机,带调压器试验时,冲击短路电流为发电机额定电流的5.1倍,延伸到短路瞬时可达7.4倍。若此发电机在实船系统中发生短路,再考虑到电动机提供的短路电流,则总短路电流会更大一些。

因此,电力系统设计必须重视这一点。

当船舶电力系统发生短路时,可能造成如下破坏:

1. 电力引起的破坏。

2. 热负载引起的破坏。
3. 故障电弧引起的破坏。

由于短路故障所致，可能引起火灾，损坏电源设备，造成全系统不能工作；即使电源设备不损坏，大的短路电流也可能使电网电压大大降低，影响用电设备的正常工作，比如使主机设备和舵机设备失灵。显而易见，短路故障必将直接影响船舶的正常航运甚至危及安全。

特别是近年来，随着船舶的大型化、高速化和自动化，船舶电站的安装容量和可能出现短路电流值都有显著的增加，尤其是客船、冷藏船及其他大型船舶和高速船舶更是如此。

图1.3.1表示总登记吨位约为30000吨的船舶，在约5年内发电机平均安装容量及其冲击短路电流的增加情况。应该说明，该图中货船和集装箱船的冲击短路电流是在假设条件下得到的计算值。

假设 $n = 1.8$ (发电机端短路)

$$x_d' = 14\% = 0.14$$

(标么值)

$$U = 450 \text{ (伏)}$$

利用下述计算式进行计算，

$$I_K = n \sqrt{2} I_K'$$

$$I_K' = \frac{1}{x_d'} I_n$$

$$I_K = n \sqrt{2} \frac{1}{x_d'} I_n$$

$$S = UI_n \sqrt{3}$$

$$I_n = \frac{S}{U \sqrt{3}}$$

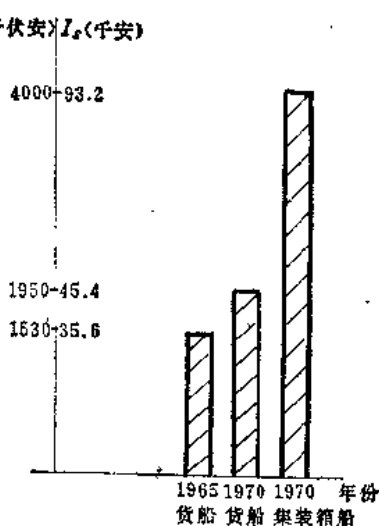


图1.3.1 总登记吨位约为30000吨的船舶发电机平均安装容量和冲击短路电流值

$$I_s = \frac{n \sqrt{2} S}{U \sqrt{3} x_d''}$$

由于船舶向大型化、高速化和自动化发展的结果，用电设备对供电质量的要求也越来越高，都务必要非常重视船舶电力系统的可靠性，以保证船舶的正常航运和安全，提高战斗舰艇的生命力等。这是因为在大多数情况下，船舶主机设备、舵机设备以及导航设备等，都受到电网供电质量的影响。所以计算船舶电力系统的短路电流是非常必要的。正因为如此，目前世界上很多国家的船舶规范都明确提出，要提交短路电流计算书。

在船舶电力系统设计时，精确地推算电网中各点的短路电流值大小，可以合理地选择配电方式和保护装置，以保证电力系统发生短路时，能快速有效地切断短路故障，使系统与短路故障点断开，防止从故障点发生火灾和避免损坏设备，把短路破坏限制在最小的限度。

对船舶电力系统设计而言，计算短路电流不外乎下述两个方面的目的：在船舶电力系统初步设计时，推算短路电流，以选择电气设备（例如空气断路器），给电网的保护提供必要的数据；而在电力系统业已确定之后，计算短路电流，用以校验设计中所选用的电气设备的热稳定性（如配电板汇流排），校验电气设备的电动力稳定性（如汇流排）以及校验所选定开关（如断路器）的断流容量和接通容量^[4]。

因此，应该十分重视船舶电力系统的短路电流计算。换句话说，短路电流计算，是船舶电力系统设计的重要内容之一。所以，目前各船级社都要求送审电力系统的短路电流计算图纸资料。

第二章 交流电路的短路电流

船舶电网运行可以分为两种工作状态，即稳定工作状态（亦称稳态）和瞬态工作状态（亦称过渡工作状态或暂态工作状态）。

当电网中的负载保持恒定不变（负载的等效阻抗保持不变）时，我们认为系统处于稳定工作状态。此时，电压、电流、功率等都保持不变，其值与负载阻抗有关。

当电网中负载由某一值突然变到另外一个新值时，电网中的电压、电流和功率等参数，将随负载阻抗的变化而变化。若负载中有感性负载和容性负载时，这些参数将要经过一段时间后才能达到新的稳定值，这时系统便处于新的稳定工作状态。

系统从一个稳定工作状态过渡到另一个新的稳定工作状态的中间过程，称之为过渡过程或瞬态过程。

船舶电力系统发生短路时，同步发电机在瞬态时所产生的过渡过程是十分复杂的。为了对短路时的一些概念有一个比较明确的了解，我们假定发电机的功率非常大，以至在电网中发生短路时，其端电压仍然不变。假如我们再假设船舶电站的负载主要是感性负载，则船舶电力系统可以看作简单三相交流电路来研究。

2.1 简单三相交流电路突然短路的瞬态过程

为了了解简单三相交流电路突然短路的瞬态过程的有关概念，可以假设电力系统三相交流电路是对称的，而且暂时不考虑发电机内部的瞬态过程。有了这个假设，则短路后的三相电路仍然可以看作是对称的。由于电力系统中三相交流电路的相电流可以视为对称的，任意两相之间仅相差 120° 相位角，所以只要研究其中一相的瞬态过程的电流、电压的变化规律，便可以了解整个

三相交流电路的电流、电压的变化规律。这里也按一般作法，首先研究简单的正弦交流 $R-L$ 电路。

从电工学的基础理论可以知道，由电感 L 、电阻 R 和电动势 $e(t)$ 串联的电路，见图2.1.1。其瞬态过程是比较简单的。因为

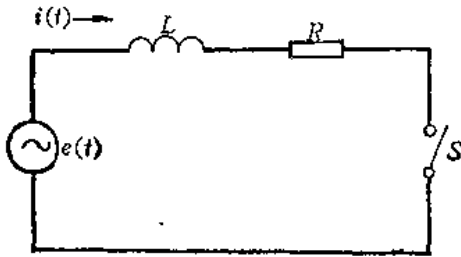


图2.1.1 $R-L$ 串联的简单正弦交流电路

没有电容，所以不会发生振荡现象。当合上开关 S 时，其瞬态过程可以用下述方程式来表示：

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.1.1)$$

因为 $e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \theta)$ ，故可以先求得式(2.1.1)的通解，再根据初始条件 $t = 0$ 时， $i(t) = 0$ ，则可以求得 $i(t)$ 的特解为^[6]：

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta - \phi) \\ &\quad - \sqrt{2} I \sin(\theta - \phi) e^{-\frac{t}{T}} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.2)$$

或者表示为：

$$\left. \begin{aligned} i(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta - \phi) \\ &\quad - \sqrt{2} I \sin(\theta - \phi) e^{-\frac{\omega t}{\operatorname{tg} \phi}} \end{aligned} \right\}$$

式中 $i(t)$ ——电路短路电流瞬时值(安)；

E ——电源电动势有效值(伏)；

I ——短路电流交流分量有效值 ($= E / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$)，(安)；

ω ——角速度 ($= 2\pi f$) (弧度/秒)；

f ——频率 (赫);

θ ——短路瞬时的电压相位角 (亦称合闸相位角)(弧度);

ϕ ——短路电路的功率因数角 ($=\text{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$)(弧度);

T ——时间常数 ($=\frac{L}{R}$)(秒);

$\theta - \phi$ ——短路瞬时的电流相位角 (弧度);

t ——短路后所经的时间 (秒)。

从式 (2.1.2) 可以看出, 简单交流电路的短路电流, 由下述两部分组成:

1. 稳态交流分量, 亦称周期分量。即式 (2.1.2) 右边第一项。

2. 直流分量, 亦称非周期分量。即式 (2.1.2) 右边第二项。

直流分量是随时间而衰减的。交流分量与直流分量的合成电流, 即为非对称短路电流。下面分别研究各分量的特性。

一、短路电流的交流分量

式 (2.1.2) 中右边第一项即为短路电流的交流分量, 如果用 $i_{ac}(t)$ 表示的话, 则,

$$i_{ac}(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \theta - \phi) \quad (2.1.3)$$

其波形如图 2.1.2 所示。

从式 (2.1.3) 和图 2.1.2 可以看出:

1. 交流分量是个稳态值, 其最大值和时间没有关系, 等于 $\pm \sqrt{2} I$ 。

2. 短路瞬时 ($t = 0$), 短路电流的交流分量为:

$$i_{ac}(0) = \sqrt{2} I \sin(\theta - \phi) \quad (2.1.4)$$

由式 (2.1.4) 可以看出, 该值的大小取决于 I 、 θ 和 ϕ 值。 $i_{ac}(0)$ 称为初始值。

3. 在发生短路后各不同时间的短路电流交流分量的瞬时值是不同的, 当 $\sin(\omega t + \theta - \phi) = \pm 1$ 时, 其值为最大, 即最大值

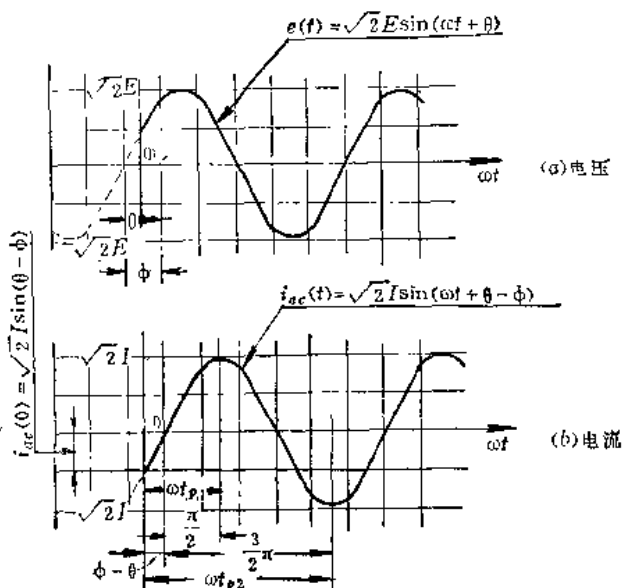


图2.1.2 短路电流交流分量的波形

$$i_{ac}(t) = \pm \sqrt{2} I。$$

$$\text{换句话说, 当 } \omega t_p + \theta - \phi = -\frac{\pi}{2} + k\pi \quad (2.1.5)$$

时, 短路电流交流分量出现最大值。

式中 $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ 。

二、短路电流的直流分量

在式 (2.1.2) 中, 右边第二项表示短路电流的直流分量, 如果用 $i_{dc}(t)$ 表示的话, 则:

$$\left. \begin{aligned} i_{ac}(t) &= -\sqrt{2} I \sin(\theta - \phi) e^{-\frac{t}{T}} \\ \text{或} \quad i_{dc}(t) &= -\sqrt{2} I \sin(\theta - \phi) e^{-\frac{\omega t}{\text{tg} \phi}} \end{aligned} \right\} (2.1.6)$$

其波形如图2.1.3所示。

从式 (2.1.6) 和图2.1.3可以看出:

1. 短路瞬时 ($t = 0$), 短路电流的直流分量为:

$$i_{dc}(0) = -\sqrt{2} I \sin(\theta - \phi) \quad (2.1.7)$$

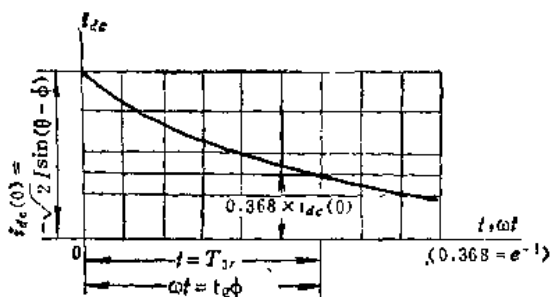
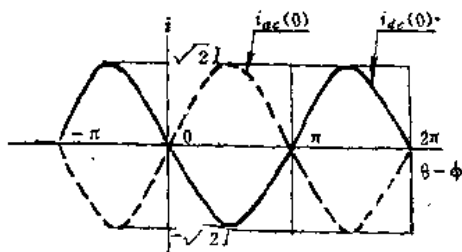


图2.1.3 短路电流直流分量的波形

该值的大小与短路瞬时的短路电流交流分量 $i_{ac}(0)$ 相等，而方向相反，也是与 I 、 θ 和 ϕ 有关。

图2.1.4表示出 $i_{ac}(0)$ 、 $i_{dc}(0)$ 和 $(\theta - \phi)$ 的关系。

2. 直流分量是随时间增加而衰减的，衰减快慢取决于时间常数 $T \left(= \frac{L}{R} \right)$ 或 $\text{tg} \phi \left(= \frac{X}{R} \right)$ 。

图2.1.4 $i_{ac}(0)$ 、 $i_{dc}(0)$ 和 $(\theta - \phi)$ 关系

3. 图2.1.5表示不同短路功率因数下直流分量的初始值和衰减状态。其中：

(a) 表示 $(\theta - \phi) = -\frac{\pi}{2}$ 时，即 $i_{dc}(0)$ 为最大正值的合闸相位角的情况。

(b) 表示 $\theta = 0$ ，即得到非对称最大峰值合闸相位角的情况。

这里应该指出的是：作为交流电路，研究其短路电流瞬态过程的电路条件，往往给定的参数有 $\cos \phi$ 、 T 和 $\frac{X}{R}$ 等，在计算短路电流和选择断路器时，经常混合使用这些参数。此时，各参数可以按下式进行换算（参照图2.1.6）^{〔5〕}：