

繼電保護裝置叢書

第 二 冊

短路電流計算

張 道 民 著



水利電力出版社

64
17

內 容 提 要

本書用通俗的文字對適用於繼電保護裝置專業的短路電流計算作了比較完整而簡明的介紹。書中對於各種可能發生的短路情況如何進行計算都作出實用的計算公式，特別對於計算不對稱短路方式所必須的對稱分量法作了較詳細的闡述和推論，對於比較複雜而又常常會碰到的一些故障形式（譬如斷綫、兩點接地、振蕩以及短路時考慮負荷電流的影響等）也都介紹了實用的計算方法，最後又介紹了在工程進行短路電流計算所採用的計算模型（直流計算台）的實現原則。

本書公式的推導都是應用簡單的代數工具，因此只要具有初中程度的工作人員就可以通過自學來掌握。本書也可供從事繼電保護裝置和其他電氣領域內擔任設計、運行和調整試驗的初級技術人員以及電氣技工學習用，同時也可供中等技術學校和技工學校的教學參考用。

繼電保護裝置叢書

- | | | | |
|-----|--------------|------|-------------------|
| 第一冊 | 電路的基本原理 | 第十冊 | 電網的高頻保護裝置 |
| 第二冊 | 短路電流計算 | 第十一冊 | 發電機和同期調相機的保護裝置 |
| 第三冊 | 繼電保護和繼電保護裝置 | 第十二冊 | 變壓器和發電機-變壓器組的保護裝置 |
| 第四冊 | 電流互感器和電壓互感器 | 第十三冊 | 母綫和低压母綫引出綫的保護裝置 |
| 第五冊 | 電網的電流和電壓保護裝置 | 第十四冊 | 電動機的保護裝置 |
| 第六冊 | 電網的方向保護裝置 | 第十五冊 | 交流操作的繼電保護裝置 |
| 第七冊 | 電網的接地保護裝置 | 第十六冊 | 繼電保護裝置試驗 |
| 第八冊 | 電網的差動保護裝置 | | |
| 第九冊 | 電網的距离保護裝置 | | |

短 路 電 流 計 算

張 道 民 著

*

2062.D592

水利電力出版社出版（北京西郊科學路二里溝）

北京市書刊出版業營業許可證出字第105號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

787×1092 1/32 開本 * 4% 印張 * 101 千字

1959年6月北京第1版

1959年6月北京第1次印刷(0001—9,680冊)

統一書號：15143·1640 定價(第9類)0.49元

第一章 短路的一般概念 3

第1节 短路和短路的类型 3

第2节 短路电流的变化过程 6

第3节 短路产生的原因 10

第4节 短路的后果 11

第5节 短路点的过渡电阻 13

第二章 短路电流计算的步骤 14

第1节 短路电流的计算条件 14

第2节 计算的程序 17

第3节 有各单位制和标么制的计算方法 19

第4节 电力系统中发电机、变压器和送电线路的电抗 28

第5节 网络变换和计算电流分布的基本公式 31

第三章 对称分量 37

第1节 对称分量法的一般概念 37

第2节 线路的相序电抗与自感抗和互感抗的关系 41

第3节 相序网络的性质 43

第4节 负序和零序电抗 46

第5节 相序网络的拟制 50

第6节 平行线路考虑零序互感影响时零序等
价网络的拟制 53

第四章 短路电流计算62

第1节 三相短路电流计算62

第2节 两相短路电流计算73

第3节 大接地电流电网中单相接地短路电流的计算80

第4节 大接地电流电网中两相接地短路电流计算87

第5节 三相接地短路电流计算92

第6节 小接地电流电网中两相接地短路电流计算93

第7节 两点接地短路电流计算96

第8节 考虑负荷电流影响时的短路电流计算103

第9节 断相110

第10节 绕组联接成Y/Δ的变压器两侧的短路116

第五章 不正常运行方式126

第1节 不正常运行方式的一般概念126

第2节 过负荷的特征128

第3节 振荡的特征129

第4节 振荡电流的简便计算133

第六章 直流计算台137

第1节 概述137

第2节 直流计算台的原理和类型138

第3节 直流计算台的结构140

第4节 比例系数的选择143

第5节 直流计算台的使用方法和操作步骤144

第6节 用直流计算台计算两点接地短路电流的方法147

目 录

第一章 短路的一般概念	3
第1节 短路和短路的类型	3
第2节 短路电流的变化过程	6
第3节 短路产生的原因	10
第4节 短路的后果	11
第5节 短路点的过渡电阻	13
第二章 短路电流计算的步骤	14
第1节 短路电流的计算条件	14
第2节 计算的程序	17
第3节 有名单位制和标么制的计算方法	19
第4节 电力系统中发电机、变压器和输电线路的电抗	28
第5节 网络变换和计算电流分布的基本公式	31
第三章 对称分量	37
第1节 对称分量法的一般概念	37
第2节 线路的相序电抗与自感抗和互感抗的关系	41
第3节 相序网络的性质	43
第4节 负序和零序电抗	46
第5节 相序网络的拟制	50
第6节 平行线路考虑零序互感影响时零序等 价网络的拟制	53

第四章	短路电流計算	62
第1节	三相短路电流計算	62
第2节	两相短路电流計算	73
第3节	大接地电流电网中单相接地短路电流的計算	80
第4节	大接地电流电网中两相接地短路电流計算	87
第5节	三相接地短路电流計算	92
第6节	小接地电流电网中两相接地短路电流計算	93
第7节	两点接地短路电流計算	96
第8节	考虑負荷电流影响时的短路电流計算	103
第9节	断相	110
第10节	繞卷联接成Y/Δ的变压器两侧的短路	116
第五章	不正常运行方式	126
第1节	不正常运行方式的一般概念	126
第2节	过負荷的特征	128
第3节	振蕩的特征	129
第4节	振蕩电流的簡便計算	133
第六章	直流計算台	137
第1节	概述	137
第2节	直流計算台的原理和类型	138
第3节	直流計算台的结构	140
第4节	比例系数的选择	143
第5节	直流計算台的使用方法和操作步骤	144
第6节	用直流計算台計算两点接地短路电流的方法	147

第一章 短路的一般概念

第1节 短路和短路的类型

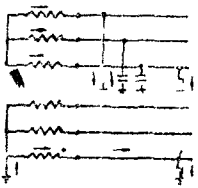
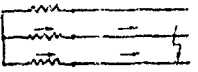
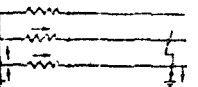
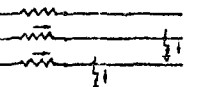
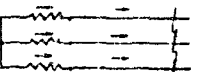
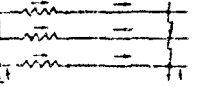
在电力系统或繼电保护装置設計和运行时，都必須考虑到在电力系统中有可能会发生故障和不正常的运行情况。在这种情况下，用户的供电和用电设备的正常工作条件遭到破坏。根据电力系统多年的实际运行經驗，一般最常見的破坏电力系统正常运行的故障是各种短路。

所謂短路是指在正常运行情况以外的一切相与相間的連接，在中性点接地的系統或者在三相四綫制的系統中，并指一相或多相接地(或与中性綫連接)。在短路时电源的电势(如发电机)被分路，或者經很小的发电机、变压器和綫路的串联阻抗而被短接。

在电机和电器中除了上述各种短路外，还可能发生一相匝間的短路。

在中性点不接地的系統中，单相接地不会造成短路，因为故障相的电势两端并未被短接(見表 1-1)。这种短路在本書中不拟討論。但是这时有不大的电容电流經非故障相導綫对地的电容流过故障点。在这种接地故障时系統的綫电压仍保持不变。因此在中性点不接地的系統中单相接地与上述各种短路故障有很大的不同。它既不会立刻影响电力用户的工作，也不会破坏发电机間的同步运行。所以如果接地电容电流不太大时，一般不会直接破坏电力用户的正常工作。但是由于这种接地故障引起系統中性点电位的移动，非故障相对

表 1-1

短 路 类 别	示 意 图
单相短路 a) 单相接地短路	
两相短路 a) 两相间的短路	
三相短路 b) 两相在一点接地短路(两相接地短路)	
三相短路 c) 两相在不同地点接地短路(两相接地短路)	
三相短路 a) 三相间的短路	
三相短路 b) 三相在一点接地短路(三相接地短路)	

地电位的升高，因而当系统带着一个接地故障运行的时间过长或接地电容电流太大时，都可能导致非故障相对地绝缘的损坏，造成两点在不同的地点同时接地短路（即两点接地短路）或者由单相接地故障转变成相间短路。

一般在三相交流电力系统中的短路类型如表1-1所示。

在中性点接地的电力系统中单相接地不会引起中性点电位的移动，非故障相的对地电压也不会升高，不会导致非故障相绝缘的损坏，同时在中性点接地的电力系统中单相接地短路将被迅速切除。电力系统中两相在不同地点发生接地短路的可能性很小。为了简化继电保护装置的设计和运行，通常不考虑这种故障。必须指出，当雷电强烈的时期，在中性点接地的电力系统中，也很可能在两点甚至在三点同时发生故障，尤其在双回路送电的情况下更容易发生。

在电力系统中还可能发生一相或两相的断线故障，而断线故障又往往随着短路同时发生。例如：在线路中某导线断裂时，导线接近绝缘子的一端仍被绝缘着，另一端则落到地上而造成单相接地短路。研究短路的这种复杂情况比较麻烦，利用对称分量的原理可以得到严格的解答。这种复杂的短路在专门的书籍中有详细的介绍，本书中不拟讨论。拟制出复杂短路的短路电流计算方法主要是为了研究在这种复杂短路的情况下，继电保护装置的工作情况和高压线路对邻近通讯线路或铁路自动闭塞信号的危险干扰影响程度。当电力系统装设有单相自动重合闸或送电线路按相检修时，考虑这种复杂短路的意义就更加重大。

架空送电线路在电力系统中一般是一个比较薄弱的环节，在高压电力系统的故障中，有相当大的数量是发生在架空送电线路上。现将电力系统中发生事故的处所并且包括短

路、过负荷和其他破坏系统正常运行情况在内的相对次数列出如下：

在电网中的事故(架空或电缆线路)……44.5%

在发电厂和变电所电气部分中的事故……55.5%

苏联的运行经验指出，在中性点接地的电力系统中最常见的故障是单相接地短路，约占所有类型总数的65~70%。随着杆塔型式(金属的或木质的)和高压电网中其他特点的各不相同，两相短路约占10~15%，而两相接地短路约占10~20%。三相短路约占电力系统中所有短路情况的5%，随着电网电压的升高，发生三相短路的或然率就会逐渐降低。

根据统计资料，在220千伏的电网中发生三相短路是很稀有的现象。在330千伏或以上的电网中几乎可以认为不会发生三相短路。

综上所述，三相短路是很少的。但是如果因此得出结论，认为三相短路一支都可以不考虑是不正确的。因为三相短路虽然很少，但毕竟还有发生的可能，并且从系统稳定运行的观点出发，三相短路起着决定性的作用，此外研究三相短路之所以特别重要，是因为我们经常应用对称分量的原理将任何不对称的短路看成某种假设的三相短路来计算。

第2节 短路电流的变化过程

当发生短路时，电力系统从正常情况过渡到短路运行方式。此时系统短路电流随时间的变化曲线如图1-1所示。从短路开始，经过短路的暂态过程，到短路的稳定状态，约需延续3~5秒。

从图1-1中可以看出全短路电流 i ，在刚开始短路以后头几个周期内对时间轴 t 是不对称的。不对称的原因是由于在

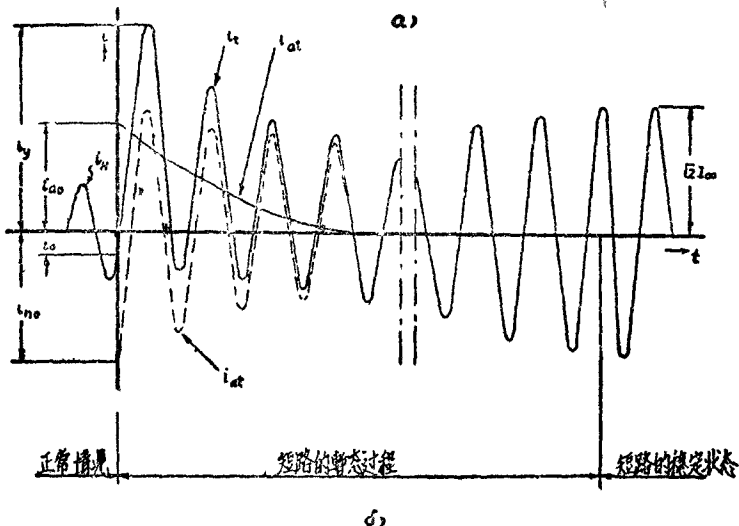
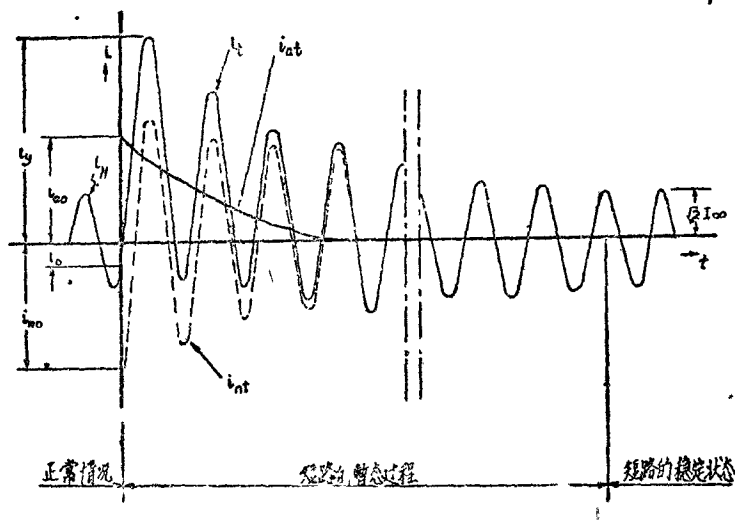


图 1-1 突然短路时短路电流随时间变化的曲线

a—发电机不具有自动电压调整器时短路电流随时间的变化曲线；b—发电机具有自动电压调整器时短路电流随时间的变化曲线。

i 中存在着非周期分量。短路时短路回路的阻抗突然减小，由于短路回路中存在着电抗，短路电流不可能立刻增大，因此，在刚开始短路的瞬间($t=0$ 秒)短路电流的非周期分量与短路电流的周期分量两者的方向相反，它们的和等于刚开始短路前电流的瞬时值，即：

$$i_{ao} + i_{no} = i_o. \quad (1-1)$$

式中 i_{ao} ——刚短路时，短路电流非周期分量的瞬时值；

i_{no} ——刚短路时，短路电流周期分量的瞬时值；

i_o ——刚短路前电流的瞬时值。

短路电流的变化特性与供给短路电流的发电机是否装设有自动电压调整器有关。图 1-1a 所示为发电机不具有自动电压调整器时，短路电流随时间变化的曲线。开始短路时，短路电流从起始瞬时值 i_o 剧烈增加达到最大值 i_y ，然后再逐渐降低到稳态短路电流值 I_{∞} 。

图 1-16 为发电机具有自动电压调整器并且短路点很远时，短路电流随时间的变化曲线。图 1-16 与图 1-1a 的区别在于短路电流的周期分量衰减到一定的程度后，由于自动电压调整器的作用，发电机的电势增高，因而短路电流又重新增大。由于自动电压调整器固有的惯性，它不能在发生短路时立刻动作，通常要在短路后 0.2~0.3 秒才起作用。如果短路点很近时，短路电流随时间的变化曲线与发电机不具有自动电压调整器的情形相同，不过这时的短路电流值（在 0.2~0.3 秒以后）较不具有自动电压调整器时要大些，并且短路延续的时间越长，也就大得越多。

全短路电流的最大瞬时值 i_y 叫做冲击电流，它大约在发生短路后半个周期时出现，当频率 $f=50$ 赫时，这个时间为 0.01 秒。冲击电流的数值决定于发电机的型式和短路的类

型，并且主要决定于发电机轉子上是否装設有阻尼繞組。阻尼繞組的存在会使发电机的同步电抗在短路的初瞬間大大地降低，因而短路电流增加。在汽輪发电机的出綫端处短路时，由于汽輪发电机的轉子本身就有很大的阻尼作用，因而短路电流的冲击值可能达到18~19倍的額定电流。对于水輪发电机由于在大多数情况下不具有阻尼系統，冲击电流的倍率为5~8。

全短路电流在任意時間 t 的瞬时值 i_t ，包括周期分量 i_{nt} 和非周期分量 i_{at} 两部分，所以 i_t 可用下式表示：

$$i_t = i_{nt} + i_{at} = \sqrt{2} I_{nt} \cos \omega t + I_{at}. \quad (1-2)$$

全短路电流的有效值 I_t 可以从下式求出：

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2}. \quad (1-3)$$

式中 I_{nt} ——短路电流周期分量在時間 t 的有效值；

I_{at} ——短路电流非周期分量在時間 t 的有效值。

非周期分量在一个周期內的有效值通常采取等于在該周期中点的瞬时值，即：

$$i_{at} = I_{at}.$$

非周期分量是按照指数函数的規律衰减的，故可用下式表示：

$$i_{at} = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1-4)$$

式中 $e = 2.718$ ——常数；

$T_a = \frac{L_x}{R_x}$ ——時間常数。 L_x 和 R_x 分别为短路回路中

电感和电阻的总和。

短路电流周期分量在不同時間的有效值在实用中是利用运算曲綫法来进行計算的。考虑到在繼电保护裝置的設計和

运行調整計算中，大多数情况下只用到瞬間($t=0$ 秒)短路电流周期分量的有效值 I''_K ，因而为了实用起见，本書以后只講短路暫态过程中短路电流周期分量 I''_K 的計算方法，对于运算曲线和非周期分量的詳細計算不作介紹。

在設計和运行繼电保护装置时，一般只計算瞬間短路电流周期分量的有效值 I''_K ，这是因为：

1. 非周期分量衰减較快，通常从短路开始經過 0.15~0.2 秒以后就已衰减到零，因而对一般带时限动作的保护装置是沒有影响的。在選擇快速动作繼电保护装置的動作参数时，可用一个系数来考虑非周期分量的影响，这样就簡化了計算，又能滿足实际工作的需要。

2. 目前电力系统中的发电机上一般都装設有自动电压調整器一类的自动調压設備，因而当短路点較远时，由于自动电压調整器的作用，短路电流衰减不大，对带时限动作的保护装置影响很小。当短路点靠近保护装置安装处时，快速动作的保护装置在短路电流还未大量衰减以前就已經动作，将短路切除。

第 3 节 短路产生的原因

电力系统中絕緣的破坏是产生短路的主要原因。絕緣的破坏在大多数情况下是由于未及时发现和未及時消除設備中的缺陷，以及設計、安装和运行維護不良所致。

譬如过电压、直接雷击、絕緣材料的陈旧、絕緣配合不好、直接的机械损坏等原因就經常造成絕緣的损坏。

运行人員带負荷打开隔离开关或者綫路檢修完毕后，接地綫未拆开就加上电压等等的誤操作也会引起短路故障。

在过負荷的元件中，如果長時間流过的电流超过长期持

續容許電流值，則導電部分的溫度將升高到不能容許的程度，其絕緣就會加速衰老或者損壞。在空氣污穢其中含有損壞絕緣的氣體或固體物質的地區（在某些化工廠附近或海邊），如果不考慮加強絕緣，經常進行維護檢修或者採取其他特殊防護措施，也很容易發生短路。

電力系統中的某些事故也可能直接導致短路，譬如導線的斷裂和杆塔的倒塔事故等。

此外因動物或飛禽跨接載流部分而造成的短路為數也是不少的。

根據蘇聯的統計資料，發生故障的原因的相對比數，列出如下：

雷電事故引起的短路	7.2%
導線的故障	10.9%
電纜的故障	21.3%
杆塔的故障	3.2%
綫路絕緣子和管型避雷器的故障	1.9%
發電廠和變電所電氣設備的故障	28.4%
繼電保護裝置和自動裝置不正確動作	11.9%
運行人員誤操作	15.2%

過去曾經有人錯誤地認為運行中的事故是不可避免的，但是實際上只要仔細嚴格地遵守電氣設備的運行規程，並且採取一些必要的措施：有計劃地檢修、消除設計安裝和製造方面的缺陷、採取防止雷害、冰荷等大氣現象的適當方法、採用各種型的自動裝置、防止運行人員可能的誤操作等等，一切事故都是可以避免的。

第4節 短路的後果

隨着發生短路的地点和持續時間的不同，短路的後果可

能仅局限于一小部分，也可能影响到整个系统。通常短路的危险后果如下：

1. 在绝缘损坏处常常发生电弧，使故障元件破坏。短路电流越大，通过的时间越长，故障元件破坏的程度也越大。

2. 短路电流常常超过发生故障支路内的额定电流的很多倍，因此即使短路电流通过的时间很短，也会使短路电流所经过的元件和导体引起不容许的发热，从而损坏绝缘。

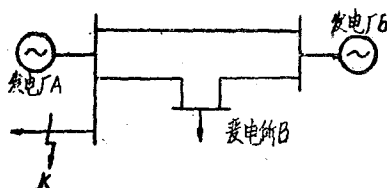
3. 短路电流能引起很大的机械应力，如果导体和它们的支架不够坚固，则可能遭到破坏。

4. 短路时系统电压大量降低，用户的工作遭到破坏。通常非同步电动机是最主要的电力用户，而非同步电动机的转矩 M ，是与其端子上电压的平方成正比，即 $M \propto U^2$ 。

因此当电压降低时，转矩 M ，也大量降低，当电压降低额定电压的30~40%以上，并且时间长达一秒鐘以上时，电动机就可能停止转动。

5. 电压的降低可能引起发电机间并列运行的破坏，亦即破坏稳定，从而导致整个电力系统正常运行中断的严重事故。

这可以用图 1-2 来加以说明。在正常情况下，透平机的



旋转力矩与其本身的发电机的有效负荷平衡，因此每台透平机的转速保持恒定不变，并且等于同步转速。

图 1-2 电力系统接线图

当发电厂 A 的母线或引出线端 K 点发生短路时，发电厂 A 母线上电压降低到零，因而发电厂送出的

有效負荷也为零。但是透平机調整器动作带有时滯，故供給透平机的蒸汽仍与短路以前一样，所以透平机軸上的轉矩仍保持不变。由于上述原因，透平发电机的轉速开始迅速增加。

发电厂 B 的发电机距短路点 K 較远，所以发电机电压母綫上的电压还有相当的数值。同时由于发电厂 A 不可能送出任何功率，这时整个系統的負荷都由发电厂 B 的发电机供給，所以发电厂 B 的发电机可能过負荷，轉速降低。因此短路可能使系統中各发电厂的发电机彼此轉速不同，从而导致整个系統并列运行的破坏。通常短路持續的时间越长，这种破坏系統并列运行的可能性也愈大。

6. 当短路切除后，在系統中的发电机彼此重新拉入周期的过程中，可能伴随着电压和电流的周期性摆动(振蕩)，这对系統中的电力用户是有害的。

7. 接地短路时的不平衡电流能产生很大的磁通，在邻近电路內感应出很大的电动势。这对于架設在高压送电綫附近的通訊綫路或铁路自动閉塞信号的影响特別大。

第5节 短路点的过渡电阻

在发生短路的地点，通常都存在着过渡电阻 R_n 。过渡电阻是短路电流从一相至另一相或从一相至大地所經過的元件的电阻所組成。过渡电阻 R_n 中通常包括电弧电阻，外物电阻、导綫与地之間的电阻(当导綫落在地面上时)、杆塔的接地电阻、利用木質絕緣时木杆的电阻等。

大多数情况下，短路都伴有电弧的产生。一般电弧电阻 R_0 不容易精确地求出，在作近似估計时，可按下式求出：

$$R_0 \approx \frac{1000}{I_0} \cdot I_0. \quad (1-5)$$