

34

短路电流

实用计算方法

西安交通大学
电力工业部西北电力设计院
电力工业部西北勘测设计院
编 著



电力工业出版社

1973
TM73
1

5922

TM713

1

短路电流实用计算方法

西 安 交 通 大 学

电力工业部西北电力设计院 编著

电力工业部西北勘测设计院

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书从同步电机基本理论出发,阐述选择电器设备用的短路电流周期分量实用计算方法,并根据我国情况制定了运算曲线;对短路电流非周期分量、冲击电流以及热效应也提出了新的计算方法。所述方法已经电力部电力建设总局、水力发电建设总局审查同意在工程设计中试行。

本书由西安交通大学肖惕同志等人编写。

本书供从事电力工业的设计、运行人员使用,其它行业的电气设计、运行人员及高等学校有关专业师生也可参考。

短路电流实用计算方法

西 安 交 通 大 学

电力工业部西北电力设计院 编著

电力工业部西北勘测设计院

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 6 $\frac{1}{4}$ 印张 137千字
1982年7月第一版 1982年7月北京第一次印刷

印数 00001—15650 册 定价 0.70 元

书号 15036·4343

中华人民共和国电力工业部 电力建设总局 水力发电建设总局 联合发文

关于试行《短路电流实用计算方法》的通知

(80)火设字第296号

(80)电水机字第688号

由电力工业部电力建设总局和水力发电建设总局委托西安交通大学发电教研室进行的《短路电流实用计算方法》科研任务，现已完成。

这项科研成果是以西安交通大学为主，并由电力工业部西北电力设计院、西北勘测设计院、水利部北京勘测设计院等单位参加共同完成的。研究工作从一九七七年开始，历时三年多，进行了大量的计算和论证分析。《方法》中根据国产机组的参数，考虑到我国电力系统负荷分配的实际情况，用概率统计的方法制定了新的短路电流运算曲线，并对非周期分量的时间常数及短路电流热效应计算提出了新的方法。这项科研成果经过一九七九年九月在西安和一九八〇年三月在无锡召开的两次会议的讨论审查。有关的高等院校，电力部及水利部的科研、设计、运行部门以及一机部电机制造厂等30多个单位的代表出席了这两次会议。参加这项科研任务的单位根据会议所提出的意见进一步作了修改和补充，现经电力建设总局、水力发电建设总局审查同意在工程设计中试行。各单位在试行中如发现有不妥和需要补充之处，请及时函告我们。

一九八〇年十二月十六日

前 言

选择电器设备用的短路电流计算，是电力设计人员最经常的任务之一，它应简便、可靠。我们在总结建国以来所采用的实用短路电流计算法的基础上，根据同步电机过渡过程的理论，对实用短路电流计算作了系统的研究，提出了适合我国电力系统情况的短路电流实用计算方法（以后简称“方法”）。这个方法的特点是：

1. 在调查国产同步发电机参数和容量配置的基础上，用概率统计方法制定了新的短路电流周期分量（简称周期分量）运算曲线。考虑到目前发电厂的绝大部分功率是从高压母线送出的，故按发电机在额定运行状态下，50%负荷接在高压母线上的接线方式来制定运算曲线。

2. 短路电流非周期分量（简称非周期分量）的衰减与网络的时间常数有直接关系，求复杂网络的等效时间常数（ T_a ），是一个比较困难的问题。关于 T_a 的计算，首先采用各种不同短路点 T_a 的推荐值的方法，如果对精度要求较高，可以用二支路等效网络法，即将计算用网络归并为两支，一支由系统供电（其时间常数为8~22），另一支由发电厂供电。根据这二支供电的比例，查找相应的曲线，即可以得到较准确的 T_a 值。

3. 现代电力系统的短路电流，一般由多个电源供电，系统供电部分所占比重较大，用一组只反映发电机周期分量变化的曲线来计算周期分量的热效应，已不能满足要求。“方法”根据周期分量变化的实际情况，采用了数值积分法计算周期分量的热效应，并提出了一个实用积分公式（简称1-10-1公式）。

关于非周期分量热效应的计算，也提出了用二支路等效网络法求它的等效时间常数。

4. 当需要准确地计算冲击电流时，介绍了用最佳频率法求冲击电流中非周期分量衰减时间常数的方法。

目 录

前 言

第一章 短路电流实用计算的基本假设	1
第二章 同步电机突然三相短路时电磁暂态过程的分析	2
第一节 突然三相短路电流的波形	2
第二节 计算突然三相短路电流的有关参数	3
第三节 同步电机的基本方程式	9
第四节 突然三相短路定子电流的运算法求解	15
第五节 突然三相短路电流周期分量计算公式的分析	17
第三章 短路电流周期分量的实用计算方法——运算曲线法	24
第一节 运算曲线的制定	24
第二节 同步电机参数的选取	28
第三节 “标准参数”和参数引起的修正	31
第四节 运算曲线与实际计算值相比较的误差	35
第五节 我国运算曲线与国外运算曲线的比较	37
第六节 用运算曲线法计算周期分量的步骤	40
小 结	41
第四章 短路电流非周期分量的计算	42
第一节 基本计算公式	42
第二节 复杂网络等效时间常数的计算方法	43
第三节 我国电力系统各元件的 $\frac{X}{R}$ 值	46
小 结	46
第五章 冲击电流的计算	47
第一节 基本计算公式	47
第二节 等效时间常数的计算方法	48
第三节 冲击系数 K_{ca} 的推荐值	49
小 结	50
第六章 短路电流热效应计算	51
第一节 基本计算公式	51
第二节 国外两种计算热效应的方法	51
第三节 周期分量热效应计算	55
第四节 非周期分量热效应计算	58
小 结	60

第七章 算例	61
第一节 原始数据及计算用电抗	61
第二节 短路电流的周期分量	63
第三节 短路电流的非周期分量	67
第四节 冲击电流	68
第五节 短路电流的热效应	71
附录	72
附表 1 汽轮发电机运算曲线数字表 ($X_{j*} = 0.12 \sim 0.95$)	72
附表 2 汽轮发电机运算曲线数字表 ($X_{j*} = 1.00 \sim 3.45$)	73
附表 3 水轮发电机运算曲线数字表 ($X_{j*} = 0.18 \sim 0.95$)	74
附表 4 水轮发电机运算曲线数字表 ($X_{j*} = 1.00 \sim 3.45$)	75
附图 1 汽轮发电机运算曲线[一] ($X_{j*} = 0.12 \sim 0.50$)	76
附图 2 汽轮发电机运算曲线[二] ($X_{j*} = 0.12 \sim 0.50$)	77
附图 3 汽轮发电机运算曲线[三] ($X_{j*} = 0.50 \sim 3.45$)	77
附图 4 汽轮发电机运算曲线[四] ($X_{j*} = 0.50 \sim 3.45$)	78
附图 5 汽轮发电机运算曲线[五] ($X_{j*} = 0.50 \sim 3.45$)	78
附图 6 水轮发电机运算曲线[一] ($X_{j*} = 0.18 \sim 0.56$)	79
附图 7 水轮发电机运算曲线[二] ($X_{j*} = 0.18 \sim 0.56$)	80
附图 8 水轮发电机运算曲线[三] ($X_{j*} = 0.50 \sim 3.50$)	81
附图 9 水轮发电机运算曲线[四] ($X_{j*} = 0.50 \sim 3.50$)	81
附图10~附图15 非周期分量电流等效时间常数	82
附图16~附图20 非周期分量热效应等效时间常数	88
参考文献	93

第一章 短路电流实用计算的基本假设

为了简化计算，采用了以下的一些假设。

1. 电力系统中所有发电机电势的相角都相同。

首先略去各发电机在正常运行状态下的初始相角差，也不考虑在短路过程中发电机间的摇摆现象对短路电流的影响。当发生短路故障时，各发电机的输入阻抗与转移阻抗发生突变，它们的电磁输出功率随之变化，引起了机械输入功率与电磁输出功率的不平衡。有些发电机的转子将加速（电磁输出功率＜机械输入功率）；有些发电机的转子将减速（电磁输出功率＞机械输入功率），使电力系统中各发电机间的相角差加大。它们之间的电流交换也随之增大，使电力系统电压下降，从而导致故障电流减少。现假定所有发电机的相角都相同，发电机间几乎没有电流交换，算出故障点的短路电流要比计及发电机相角差的实际的短路电流为大。

2. 电力系统中各元件的磁路不饱和，即各元件的参数不随电流而变化。因之，在计算过程中可以应用重叠原理。

3. 电力系统各元件的电阻都略去不计。只在计算非周期分量的衰减时间常数时，才计及电阻的作用。

此外，当短路发生在电缆线路或低压网络时，由于 R 对 X 的比值大，则应计及电阻，但可以不用复阻抗，而用阻抗的绝对值 Z （ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ ）进行计算。

4. 电压等级为330千伏及以下的输电线路的电容略去不计。

5. 变压器的励磁电流略去不计。

6. 对于同类型的发电机（同为汽轮发电机或水轮发电机），当它们对短路点的电气距离比较接近时，则假定它们的次暂态电势的大小和变化规律相同。因之，可以用次暂态网络（发电机用次暂态电抗 X_d'' 来代表）进行网络化简，并将这些发电机合并成一台等值发电机。

7. 发电机在额定运行状态下发生突然三相短路。

8. 故障点没有任何阻抗，即发生“金属性短路”。

9. 电力系统为对称的三相系统。

10. 负荷只作近似的估计，并用恒定阻抗来代表。

第二章 同步电机突然三相短路时 电磁暂态过程的分析

第一节 突然三相短路电流的波形

图2-1为一台没有自动电压调节器的同步发电机突然三相短路时实测的短路电流波形图。可以把图2-1中的短路电流曲线分解成与座标横轴对称的衰减的周期分量以及与座标横轴不对称的衰减的直流分量。参见图2-2。

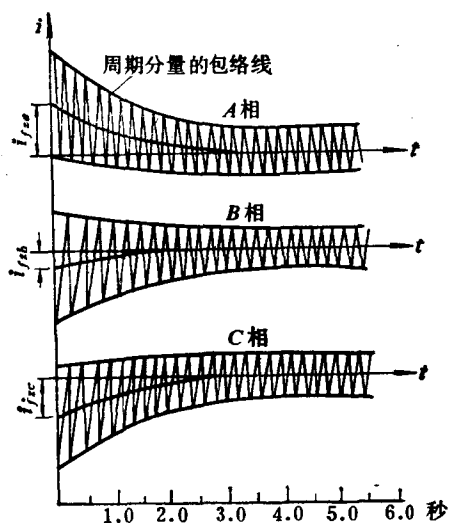


图 2-1 突然三相短路电流波形图

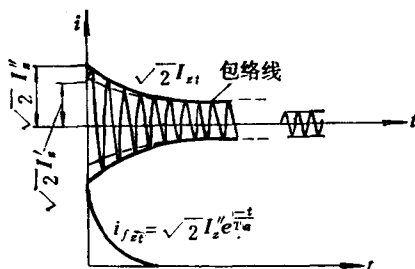


图 2-2 突然三相短路电流波形图的分解图

在短路初瞬 $t = 0$ 时，短路电流周期分量的幅值最大，这个值称为短路电流的初瞬值 $\sqrt{2} I_x''$ 。周期分量幅值的包络线 $\sqrt{2} I_{xt}$ 开始时衰减得很快，随后衰减较为缓慢，最后到达稳定值 $\sqrt{2} I_x$ 。

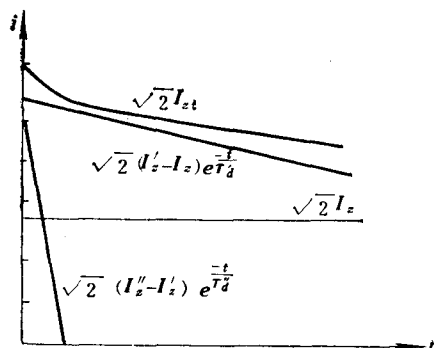


图 2-3 周期分量幅值在半对数座标纸上的分解图

为了分析短路电流周期分量的变化规律，将周期分量幅值的包络线 $\sqrt{2} I_{xt}$ 画在半对数座标纸上（参看图2-3）。此 $\sqrt{2} I_{xt}$ 可分解为三个部分：

衰减很快的 $\sqrt{2} (I_x'' - I_x') e^{-\frac{t}{T_d''}}$ ，

衰减缓慢的 $\sqrt{2} (I_x' - I_x) e^{-\frac{t}{T_d'}}$ ，

以及不变的稳定值 $\sqrt{2} I_x$ 。

显然

$$I_{zt} = (I_z'' - I_z')e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I_z' - I_z)e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_z \quad (2-1)$$

下面从突然三相短路的物理现象来进一步说明式(2-1)和有关参数的意义。

第二节 计算突然三相短路电流的有关参数

一、同步电机的电抗

同步电机发生突然三相短路后, 短路电流的周期分量产生一个与转子同步旋转的磁势(电枢反应磁势)。这个磁势所产生的磁通企图穿入转子绕组。但转子各绕组都是闭合绕组, 它们要求保持各自的磁链不突变。因此, 在励磁绕组中感应出 Δi_f , 在阻尼绕组中感应出 Δi_{Dd} 。这些感应出来的自由分量所产生的磁势, 将企图穿入转子绕组的电枢反应磁通排挤到转子绕组之外, 因而图2-4中的电枢反应磁通 ψ_{ad}'' 实际上只通过转子绕组的漏磁路。

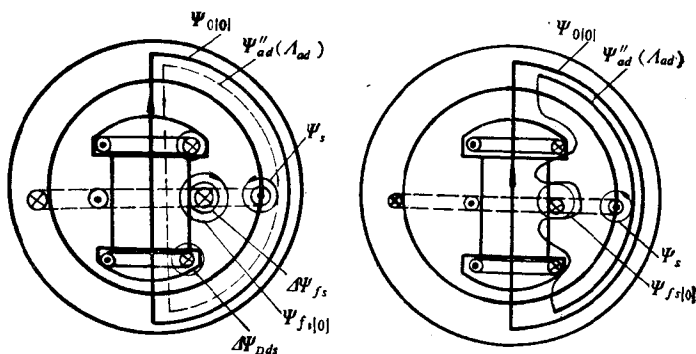


图 2-4 同步电机突然三相短路初瞬的磁通分布

这个磁路的磁导为

$$\Lambda_{ad}'' = \frac{1}{R_{ad}''} = \frac{1}{(R_{ad} + R_{fs} + R_{Dds})} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{fs}} + \frac{1}{\Lambda_{Dds}}\right)}$$

式中 R_{ad} 、 R_{fs} 和 R_{Dds} , Λ_{ad} 、 Λ_{fs} 和 Λ_{Dds} 分别为纵轴电枢反应磁路、励磁绕组漏磁路和阻尼绕组漏磁路的磁阻, 磁导。

电感与磁导的关系为

$$L = N^2 \Lambda$$

式中 N 为绕组的匝数。

用标么值表示时, 有下述关系

$$X_* = L_* = \Lambda_*$$

为简化表达式, 略去下标*,

则

$$L_{ad}'' = \frac{1}{\frac{1}{L_{ad}} + \frac{1}{L_{fs}} + \frac{1}{L_{Dds}}}$$

或

$$X_{ad}'' = \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fs}} + \frac{1}{X_{Dds}}} \quad (2-2)$$

次暂态电抗 X_d'' 是突然三相短路时, 定子电流的周期分量所遇到的电抗。即

$$X_d'' = X_s + X_{ad}'' \quad (2-3)$$

式中 X_s 为定子漏抗。

由式(2-2)和式(2-3)可以得到次暂态电抗的等值电路, 如图2-5所示。

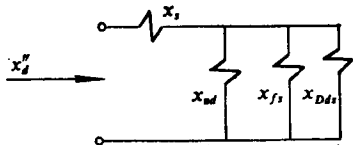


图 2-5 次暂态电抗 X_d'' 的等值电路

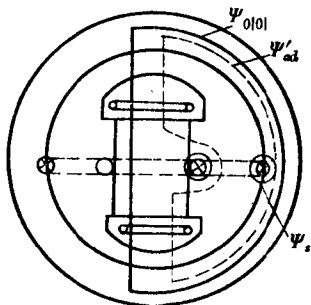


图 2-6 由次暂态过程进入暂态过程后的磁通分布

由于转子绕组并非超导体, 励磁绕组与阻尼绕组均有电阻, 其绕组中的自由分量 ΔI_f 、 ΔI_{Dd} 都将衰减。励磁绕组与阻尼绕组有磁的耦合(如同变压器一样), 它们的自由分量的变化是相互影响的, 即它们的自由分量的衰减时间常数与两个绕组的参数都有关系。实际上同步电机阻尼绕组本身的时间常数要比励磁绕组本身的时间常数小得多。在这种条件下, 可以近似地认为这两个绕组的自由分量 Δi_f 、 Δi_{Dd} 各自按照自己的时间常数进行衰减。对应于 Δi_{Dd} 急骤衰减的过程称为次暂态过程。当 $\Delta i_{Dd} \approx 0$ 时, 次暂态过程结束, 短路进入暂态过程。在整个次暂态过程中 Δi_f 几乎没有什么变化, 这近似地相当于励磁绕组在次暂态过程中处于超导状态。因此, 当短路从次暂态过程进入暂态过程时, 电枢反应磁势随着 $\Delta i_{Dd} \approx 0$ 而进入阻尼绕组, 但仍不能穿入励磁绕组(图2-6)。这时电枢反应磁通所行经的路径的磁导为

$$\Lambda'_{ad} = \frac{1}{(R_{ad} + R_{fs})} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_{fs}}\right)}$$

相应的电抗为

$$X'_{ad} = \frac{1}{\left(\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fs}}\right)}$$

同步电机的暂态电抗 X_d' , 是短路进入暂态过程时, 定子电流周期分量所遇到的电抗,

$$X_d' = X_s + X'_{ad}$$

暂态电抗 X_d' 的等值电路如图2-7所示。

随着时间的推移, 励磁绕组中的自由分量衰减到接近于零, 短路就进入了稳态过程。于是, 电枢反应磁通便穿入励磁绕组(图2-8)。这时电枢反应磁通所通过路径的磁导为

$$\Lambda_{ad} = \frac{1}{R_{ad}}$$

相应的电抗为

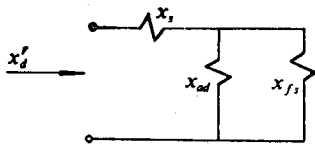


图 2-7 暂态电抗 X'_d 的等值电路

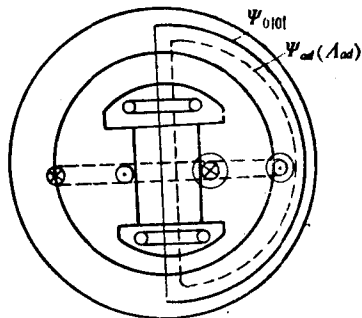


图 2-8 由暂态过程进入稳态过程后磁通的分布

$$X_d = X_s + X_{ad}$$

X_d 称为同步电机的同步电抗，它是短路过程进入稳态时定子电流所遇到的电抗。

对于 q 轴，由于没有励磁绕组，因此只有 q 轴次暂态电抗 X''_q 和 q 轴同步电抗 X_q ，它们分别为

$$X''_q = X_s + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{Dqs}}}$$

$$X_q = X_s + X_{aq}$$

二、同步电机的时间常数

根据以上所述，可以近似地认为，某一绕组中自由分量的衰减时间常数所用的电阻，是该绕组的电阻；其电抗，是该绕组自由分量产生的磁通行经的路径所对应的电抗。根据这个原则，求同步电机突然三相短路的时间常数。

1. 暂态时间常数

暂态时间常数可分为短路暂态时间常数 T'_d 和开路暂态时间常数 T'_{d0} 。

T'_d 是短路处于暂态过程时，励磁绕组中自由分量的衰减时间常数。这时阻尼绕组处于开路状态。励磁绕组的自由分量所遇到的电抗为

$$X'_f = X_{fs} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_s}}$$

$$T'_d = \frac{X'_f}{R_f} = \frac{1}{R_f} \left(X_{fs} + \frac{X_{ad} \times X_s}{X_{ad} + X_s} \right)$$

它的等值电路如图 2-9 所示。

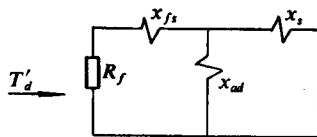


图 2-9 T'_d 的等值电路

当定子绕组开路时，则为开路暂态时间常数 T'_{d0} ，其值为

$$T'_{d0} = \frac{X_{fs} + X_{ad}}{R_f} = \frac{X_f}{R_f}$$

T'_{d0} 即为励磁绕组本身的时间常数。

T'_d 和 T'_{d0} 之间有如下关系

$$T'_d = \frac{X'_d}{X_d} T'_{d0}$$

2. d 轴次暂态时间常数

d 轴次暂态时间常数可分为短路次暂态时间常数 T_d'' 和开路次暂态时间常数 T_{d0}'' 。

T_d'' 是短路处于次暂态过程时，阻尼绕组中自由分量（对应于定子电流周期分量）的衰减时间常数。这时励磁绕组中的自由分量几乎没有衰减，可以认为励磁绕组处于超导短路状态。这时阻尼绕组中自由分量所遇到的电抗为 X_{Dd}'' ，即

$$X_{Dd}'' = X_{Dds} + \frac{1}{\left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_{fs}} + \frac{1}{X_{ad}}\right)}$$

$$T_d'' = \frac{X_{Dd}''}{R_{Dd}} = \frac{X_{Dds} + \frac{1}{\left(\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_{fs}} + \frac{1}{X_{ad}}\right)}}{R_{Dd}}$$

它的等值电路如图2-10所示。

当定子绕组开路时，则为开路次暂态时间常数 T_{d0}'' ，其值为

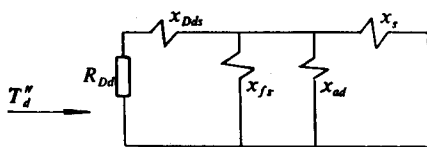


图 2-10 T_d'' 的等值电路

$$T_{d0}'' = \frac{X_{Dds} + \frac{1}{\frac{1}{X_{fs}} + \frac{1}{X_{ad}}}}{R_{Dd}}$$

T_d'' 与 T_{d0}'' 有如下关系

$$T_d'' = \frac{X_d''}{X_d'} T_{d0}''$$

3. q 轴次暂态时间常数

q 轴只有一个等值的阻尼绕组，因而只有次暂态过程。q 轴次暂态短路时间常数为

$$T_q'' = \frac{X_{Dqs} + \frac{1}{\frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_{aq}}}}{R_{Dq}}$$

q 轴次暂态开路时间常数为

$$T_{q0}'' = \frac{X_{Dqs} + X_{aq}}{R_{Dq}}$$

$$T_q'' = \frac{X_q''}{X_q'} T_{q0}''$$

三、突然三相短路的计算公式

综上所述，短路初瞬，短路电流所遇到的电抗为 X_d' 。随着阻尼绕组自由电流的衰减，短路电流所遇到的电抗由 X_d' 过渡到 X_d'' ，这个过渡过程的时间常数为 T_d'' 。随后，励磁绕组自由分量的衰减显著起来，短路电流所遇到的电抗再由 X_d'' 过渡到 X_d ，这个过程的时间常数为 T_d' 。当同步发电机在空载情况下短路时（端电压为额定值，没有自动电压调节器），短路电流的计算公式为

$$I_z'' = \frac{1}{X_d''}$$

$$I'_z = \frac{1}{X_d}$$

$$I_z = \frac{1}{X_d}$$

$$I_{zt} = \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d}$$

当同步发电机在短路前带有负荷，并且计及定子回路的电阻，同时考虑到 d 、 q 轴磁路不对称时，突然三相短路的计算公式可以从矢量图得到。

图2-11是同步发电机正常运行时的矢量图。图中 $E''_{q|0|}$ 是 X_d'' 后的电势， $E'_{q|0|}$ 是 X_d' 后的电势， $E_{q|0|}$ 是 X_d 后的电势，它们分别称为 q 轴次暂态电势、暂态电势、空载电势； $E''_{d|0|}$ 是 X_q'' 后的电势，称为 d 轴次暂态电势。

$E''_{q|0|}$ 、 $E''_{d|0|}$ 和 $E'_{q|0|}$ 这些次暂态电势和暂态电势与有关阻尼绕组和励磁绕组所交链的磁通成正比，它们是不能突变的。 q 轴空载电势 $E_{q|0|}$ 与励磁电流有关。

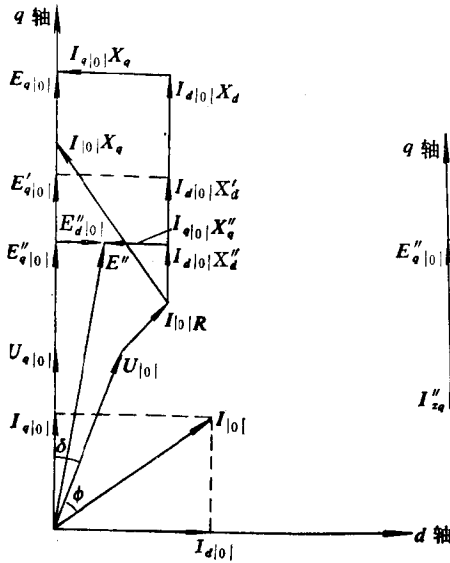


图 2-11 同步发电机正常运行时的矢量图

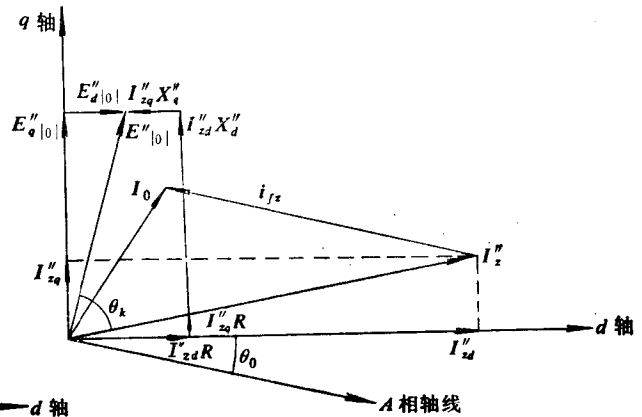


图 2-12 带负荷的同步发电机突然三相短路瞬间的矢量图

图2-12为同步发电机带有负荷时，最严重的（非周期分量电流 i_{fz} 在 A 相投影最大）突然三相短路瞬间的矢量图。

由图2-12可以得到如下的关系

$$\left. \begin{aligned} I''_{zd} X_d'' + I''_{zq} R &= E''_{q|0|} \\ I''_{zd} R - I''_{zq} X_q'' &= E''_{d|0|} \\ I''_{zd} &= \frac{E''_{q|0|} X_q'' + E''_{d|0|} R}{X_d'' X_q'' + R^2} \\ I''_{zq} &= \frac{E''_{q|0|} R - E''_{d|0|} X_d''}{X_d'' X_q'' + R^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

短路电流周期分量的初瞬值为

$$I_z'' = \sqrt{I_{zd}''^2 + I_{zq}''^2}$$

当短路由次暂态过程进入暂态过程时, 用暂态电抗及其相应的暂态电势来代替式(2-4)中的次暂态电抗及次暂态电势, 可得到

$$\left. \begin{aligned} I_{zd}' &= \frac{E_{q10}' X_q}{X_d' X_q + R^2} \\ I_{zq}' &= \frac{E_{q10}' R}{X_d' X_q + R^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

同样, 当短路进入稳态时, 有

$$\left. \begin{aligned} I_{zd} &= \frac{E_{q10} X_q}{X_d X_q + R^2} \\ I_{zq} &= \frac{E_{q10} R}{X_d X_q + R^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

同步发电机 d 轴、 q 轴的短路次暂态时间常数分别为 T_d'' 、 T_q'' , d 轴的短路暂态时间常数为 T_d' 。因而, 短路电流随着时间的变化式为

$$\left. \begin{aligned} I_{zd} &= (I_{zd}'' - I_{zd}') e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I_{zd}' - I_{zd}) e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_{zd} \\ I_{zq} &= (I_{zq}'' - I_{zq}') e^{-\frac{t}{T_q''}} + (I_{zq}' - I_{zq}) e^{-\frac{t}{T_d'}} + I_{zq} \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

上式没有计及发生短路故障时, 同步电机强行励磁装置对短路电流的影响。在短路过程中电机的主磁路不饱和, 可以用叠加原理来计算强行励磁作用所产生的短路电流增量 ΔI_{gf} , 参看式(2-71)。

$$\begin{aligned} \Delta I_{gf} = \frac{\Delta E_{gf}}{X_d} \left[1 - \frac{(T_d' - T_{Dds}) T_d'}{(T_d' - T_d'')(T_d' - T_e)} e^{-\frac{t}{T_d'}} \right. \\ \left. - \frac{(T_d'' - T_{Dds}) T_d''}{(T_d'' - T_d')(T_d'' - T_e)} e^{-\frac{t}{T_d''}} \right. \\ \left. - \frac{(T_e - T_{Dds}) T_e}{(T_e - T_d')(T_e - T_d'')} e^{-\frac{t}{T_e}} \right] \end{aligned}$$

式中 ΔE_{gf} 为强行励磁的顶值电势 E_{gfmax} 减去额定运行的空载电势 E_{q10} , 即 $\Delta E_{gf} = E_{gfmax} - E_{q10}$ 。

T_e 为励磁系统的时间常数,

T_{Dds} 为阻尼绕组漏磁场时间常数, $T_{Dds} = \frac{X_{Dds}}{R_{Dd}}$ 。

由图2-13所示的 T_{d0}'' 及 T_{Dds} 的等值电路, 可近似地取 $T_{Dds} = \frac{T_{d0}''}{2} (X_{ad} \gg X_{Dds}, X_{Dds} \approx X_{fs})$ 。

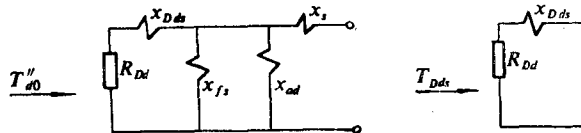


图 2-13 T_{d0}'' 及 T_{Dds} 的等值电路

计及强行励磁装置动作时的短路电流为

$$\left. \begin{aligned} I_{Zdt} &= (I''_{Zd} - I'_{Zd}) e^{-\frac{t}{T''_d}} + (I'_{Zd} - I_{Zd}) e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_{Zd} + \Delta I_{gf} \\ I_{Zqt} &= (I''_{Zq} - I'_{Zq}) e^{-\frac{t}{T''_q}} + (I'_{Zq} - I_{Zq}) e^{-\frac{t}{T'_q}} + I_{Zq} \\ I_{Zt} &= \sqrt{I_{Zdt}^2 + I_{Zqt}^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

上式为目前通用的同步电机突然三相短路周期分量电流计算公式。

第三节 同步电机的基本方程式

一、同步电机的座标变换

对于同步电机的任意一相（例如A相），可以列出计及转子励磁绕组及阻尼绕组的电压平衡方程式及磁链方程式。在一般情况下，电机 d 轴和 q 轴的磁路不对称，这些方程式是一些与定子绕组轴线和转子轴线的夹角有关的变系数微分方程组，求解这些变系数微分方程组比较困难。进行座标变换，将 a 、 b 、 c 三相座标系统的变量变换成 d 、 q 、 0 座标系统的变量，可以将变系数微分方程化为常系数微分方程。这种变换是一种数学方法，但从下面的分析可以看到这种变换的物理意义。

为了分析方便，作出如图2-14所示的理想化的同步电机模型。

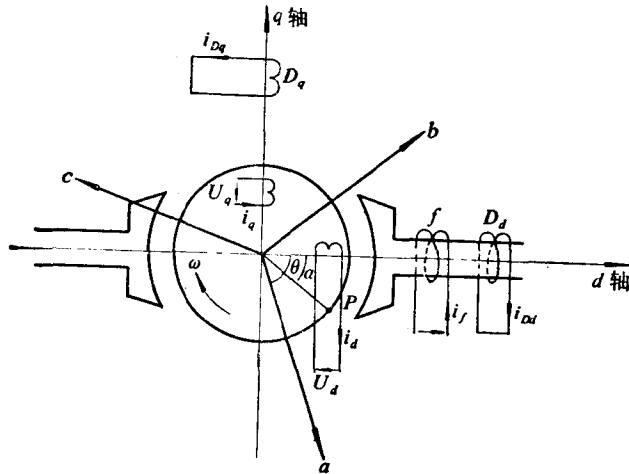


图 2-14 理想化的同步电机模型

在理想化的同步电机模型中，将通常在定子上的 a 、 b 、 c 三相绕组放在转子上，它们是旋转的，而原来在转子上的励磁绕组 f 及阻尼绕组 D_d 、 D_q 固定不动。在 d 、 q 轴线上放置和 a 、 b 、 c 绕组一样旋转的 d 、 q 假想绕组。这两个假想绕组虽然也旋转，但它们的轴线在每一瞬间总是保持与 d 轴（ d 绕组）重合或与 q 轴（ q 绕组）重合，就如整流子电机的电枢绕组那样。

平衡三相电流流过对称的三相绕组，在电机气隙中产生一个旋转磁势，这个磁势的幅值为每相磁势的 $\frac{3}{2}$ 倍，因此，为了简化各变量间的变换关系，令 d 、 q 绕组的匝数为定子

绕组（即 a 、 b 、 c 绕组）匝数的 $\frac{3}{2}$ 倍。

电流 i_a 、 i_q 在任意瞬间于电机中任一点（如图2-14中的 P 点）所形成的磁势，应与电流 i_a 、 i_b 、 i_c 所形成的磁势相等。

对于 P 点，有

$$i_a \cos(\theta - \alpha) + i_b \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2}{3}\pi\right) + i_c \cos\left(\theta - \alpha - \frac{4}{3}\pi\right) = \frac{3}{2}(i_a \cos \alpha - i_q \sin \alpha)$$

式中 θ 为 d 轴线与同步旋转的 a 轴线之间的夹角； α 为 P 点至原点的连线与 d 轴线之间的夹角（参看图2-14）。

上式对于任何 α 角都成立，因此，等式两端 $\cos \alpha$ 及 $\sin \alpha$ 的系数应相等，因而得到

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_c \cos\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \\ i_q &= \frac{2}{3} \left[i_a \sin \theta + i_b \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_c \sin\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

由于 a 、 b 、 c 三相系统的电流 i_a 、 i_b 、 i_c 是三个独立变量，与其等值的 d 、 q 、 0 座标系统中的电流也应有三个独立变量。由式（2-9）， i_d 与 i_q 在电机中产生与 i_a 、 i_b 、 i_c 等效的气隙磁势，那么第三个独立变量 i_0 只能为形成漏磁场的零序电流。令

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

因而， a 、 b 、 c 系统变换为 d 、 q 、 0 系统的关系为

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_a \cos \theta + i_b \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_c \cos\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \\ i_q &= \frac{2}{3} \left[i_a \sin \theta + i_b \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_c \sin\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \\ i_0 &= \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) \end{aligned} \right\} \quad (2-10)$$

其逆变换为

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_d \cos \theta - i_q \sin \theta + i_0 \\ i_b &= i_d \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) - i_q \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_0 \\ i_c &= i_d \cos\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) - i_q \sin\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) + i_0 \end{aligned} \right\} \quad (2-11)$$

对于电压、磁链等变量有如式（2-10）和式（2-11）同样的相应关系。

$$\left. \begin{aligned} U_d &= \frac{2}{3} \left[U_a \cos \theta + U_b \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + U_c \cos\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \\ U_q &= \frac{2}{3} \left[U_a \sin \theta + U_b \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) + U_c \sin\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \right] \\ U_0 &= \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$