

第二版

朱声石 著

高压电网继电保护 原理与技术

中国电力出版社

高压电网继电保护 原理与技术

第 二 版

朱 声 石 著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书全面地讲述了高压电力系统继电保护的原理与技术。全书分为十九章。第一、二章介绍电力系统的故障分析及短路暂态过程的概念,为继电保护动作分析的基础。第三章介绍电流、电压及输入变换器。第四、五、六章介绍继电保护用的集成电路、微机保护和模拟式继电器的基本实现方法,是继电器的基础。第七章介绍分析继电器行为常用的电压相量图法。第八章介绍各种原理的选相元件。第九至十三章对距离保护、振荡闭锁及故障分量继电器作了较详细的介绍。第十四章为线路保护的共同的一般性问题。第十五、十六章介绍线路纵联保护。第十七、十八章为线路保护的几个专门性问题。第十九章介绍母线保护。

本书可供电力系统继电保护专业的科技人员和高等院校有关专业的教师、学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压电网继电保护原理与技术/朱声石著. -2版. -北京:中国电力出版社, 1995

ISBN 7-80125-039-7

I. 高… II. 朱… III. 高电压-环网-继电保护 IV. TM77

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第08079号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1981年3月第一版

1995年8月第二版 1995年8月北京第4次印刷

787×1092毫米 16开本 23.5印张 530千字

印数 25841—29840册 定价 33.30元

版 权 专 有 翻 印 必 究

再 版 前 言

本书初版问世迄今已十五载，在此期间继电保护技术有很大的进展，已经历了集成电路保护，发展到微机保护；在产品更新换代的同时，保护的原理也有很大的进展。因此有必要对本书修订再版，以适应技术的发展，满足读者的需要。

再版中除增加新内容、删去被淘汰的内容外，还适当调整了章节以增强系统性，文字力求精练以缩短篇幅。本书第五章由隋凤海工程师执笔。本书在修订过程中得到了国内一些高等院校教授和电力部自动化研究院专家的鼓励、支持和帮助。本书承中国工程院院士杨奇逊教授审阅。在此一并表示衷心的感谢。

本书可供高等院校有关专业的大学生、研究生以及有实践经验的专业人员，在从事继电保护的科研、设计和运行时阅读参考。由于作者水平所限，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

作 者

1994 年 11 月

EA 01/12

目 录

再版前言

绪论	1
第一章 电力系统不对称故障的计算	3
1-1 对称分量(0、1、2分量)法	3
1-2 用对称分量法计算简单不对称故障	6
1-3 简单不对称短路和断线故障的计算	11
1-4 应用叠加原理计算故障	17
1-5 线路故障的几个重要特征	22
1-6 架空输电线间具有零序互感时的零序等效回路	23
1-7 用对称分量法计算复杂故障的基本问题	27
1-8 用解析法计算复杂不对称故障	28
1-9 用同、反相分量计算平行双回线上的简单故障	39
1-10 用六序分量计算同杆双回线的跨线故障	41
1-11 在A、B、C坐标系中计算不对称短路	45
第二章 高压远距离输电线路短路的暂态过程	50
2-1 短路暂态过程中各种暂态分量的基本分析	50
2-2 用拉氏变换计算线性电路的暂态过程(暂态计算的运算法)	57
2-3 高压远距离输电线路短路暂态过程的实用算法——用分布参数计算	61
2-4 高压远距离输电线路短路暂态过程的简化算法——用集中参数计算	67
2-5 不对称短路暂态分量的特点	73
第三章 电流、电压及输入变换器	75
3-1 继电保护用的电流互感器	75
3-2 电容式电压互感器	82
3-3 电流—电压变换器	84
3-4 模拟输电线阻抗的变换器	86
3-5 对称分量滤序器	87
3-6 负序滤序器	90
第四章 继电保护用的集成电路	93
4-1 运算放大器	93
4-2 继电保护常用的电路	94
第五章 微机保护	102
5-1 微机保护的基本结构	102

5-2	数字滤波器	109
5-3	微机保护的算法	115
第六章	模拟式继电器的基本实现方法	127
6-1	反应平均值的电流继电器	127
6-2	反应瞬时值的电流继电器	128
6-3	幅值比较继电器和相位比较继电器的动作特性	129
6-4	整流型比幅器	133
6-5	环形整流比相器	134
6-6	积分比相器	136
6-7	相序比相器	140
6-8	极性连续比相器	144
第七章	电压相量图法	147
7-1	导言	147
7-2	单侧电源空载线短路时的电压相量图	148
7-3	双侧电源线路短路时的电压相量图	152
7-4	复杂网络中线路短路时的电压相量图	156
7-5	应用举例	157
第八章	选相元件	160
8-1	选相元件的用途	160
8-2	电流选相元件	160
8-3	电压选相元件	162
8-4	阻抗选相元件	163
8-5	序分量选相元件	164
8-6	突变量电流选相元件	166
第九章	单相阻抗继电器及其接线法	170
9-1	比相式单相阻抗继电器	170
9-2	比幅式单相阻抗继电器	172
9-3	圆特性阻抗继电器	174
9-4	直线特性阻抗继电器	178
9-5	椭圆形、透镜形和苹果形特性阻抗继电器	178
9-6	阻抗继电器的最小精确工作电流	180
9-7	单相阻抗继电器的接线法	181
第十章	距离继电器	187
10-1	引言	187
10-2	补偿电压	190
10-3	实用的姆欧继电器	191
10-4	实用的电抗继电器	194

10-5	综合比相式距离继电器	196
10-6	四边形特性距离继电器	200
10-7	多相补偿距离继电器	202
10-8	序分量距离继电器	211
10-9	测距式距离继电器	213
第十一章 距离继电器动作行为的解析分析		216
11-1	距离继电器动作行为分析的一般方法	216
11-2	复数平面上圆和直线的反演	217
11-3	复数分式 $P = \frac{1}{1-M}$ 的轨迹与公共圆图	218
11-4	双侧电源线路上阻抗继电器动作分析的方法	222
11-5	在导纳复平面上分析阻抗继电器动作的方法	223
11-6	系统振荡时阻抗继电器的动作行为	224
11-7	过渡电阻对继电器测量阻抗影响的解析分析	226
11-8	双侧电源线路上振荡与短路同时发生时阻抗继电器的动作行为	232
11-9	线路两相运行并振荡时阻抗继电器的动作行为	234
11-10	相间多相补偿距离继电器对过渡电阻的反应能力	235
11-11	相间多相补偿距离继电器在两相运行时的动作行为	238
11-12	在振荡与一相断线接地同时发生时阻抗继电器的动作行为	242
第十二章 故障分量继电器		245
12-1	故障分量保护的基本性能	245
12-2	零序电流保护	248
12-3	负序、零序及突变量方向继电器	249
12-4	故障分量阻抗继电器	253
12-5	故障分量电抗继电器	256
第十三章 距离保护的振荡闭锁		261
13-1	电力系统振荡对继电保护的要求	261
13-2	电力系统的振荡	262
13-3	振荡对距离保护的影响	265
13-4	利用电气量变化速度来区分短路和振荡	268
13-5	短时开放保护的振荡闭锁	270
13-6	振荡过程中发生故障的判别方法	271
13-7	振荡中的选相测量	274
13-8	突变量补偿电压方向元件的应用	275
第十四章 线路保护系统设计中的一般性问题		277
第十五章 方向纵联保护与距离纵联保护		290
15-1	引言	290

15-2	闭锁式方向纵联保护	292
15-3	方向纵联保护中的方向元件	296
15-4	闭锁式距离纵联保护	301
15-5	允许式方向纵联保护与距离纵联保护	302
15-6	弱馈保护	305
第十六章	差动纵联保护	307
16-1	导引线纵联保护	307
16-2	相位比较式差动纵联保护	315
16-3	电流差动纵联保护	317
第十七章	保护的纵续动作与平行线保护	324
17-1	保护的纵续动作	324
17-2	平行线的横联保护	326
17-3	平行线的距离保护	329
17-4	同杆双回线的继电保护	332
17-5	平行线零序互感对零序电流保护的影响	335
第十八章	长线、分支线及串联补偿线路保护的问题	337
18-1	高压长线分布电容对继电保护的影响	337
18-2	超高压长线暂态过程对继电保护的影响	341
18-3	分支线路的继电保护	347
18-4	串联补偿电容器对继电保护的影响	350
第十九章	母线保护	356
19-1	母线差动保护的的特殊要求	356
19-2	母线电压差动保护	358
19-3	制动特性母线差动保护	360
19-4	复式比率差动继电器	362
19-5	双母线内部故障时故障母线的选择	363
参考文献		366

绪 论

继电保护装置是电力系统的重要组成部分，它在保证系统安全、稳定和经济运行等方面起着非常重要的作用。它在系统发生故障时切除故障设备，对系统安全运行作出贡献，但若不正确动作（包括拒动和误动），则给系统造成的危害也是巨大的。所以对继电保护装置的可靠性（Reliability）〔包括安全性（Security）和信赖性（Dependability）两个方面〕要求很高。信赖性是指不应拒动，安全性是指不应误动。系统中的重要设备如超高压线路的主保护采用双重化后，防止拒动的问题应当说基本解决了。无故障时保护的误动可以通过加强一次系统设备的冗余度来解决，即系统的一次设备满足 $n-1$ 的安全性。但故障时保护的误动（Sympathy trip）会切除 2 条以上线路，难免造成大面积停电，甚至导致系统瓦解，故是绝对不允许的。

继电保护装置除了在故障的很短时间内动作外，长期是不动作的，因而被喻为电力系统的无声警卫。因此装置的某些缺陷可能不被觉察，从而成为故障时不正确动作的隐患。这又是对其可靠性要求高的一个原因。微机保护可以实现自我监视与检测，大大提高了装置的安全性，但自我检查总不是万全的。

继电保护装置投入使用后，在它所保护的设备运行的情况下，是不允许进行调整试验的，因此继电保护的性能都力求能适应各种运行方式和各种复杂故障，所谓“以不变应万变”是继电保护装置的又一特点。但传统保护的自适应能力有限。微机保护由于微机有很强的记忆功能，并可实时跟踪计算系统运行方式的变化，从而提高了保护的自适应能力。

正是根据上述特点，对继电保护提出了快速性、灵敏性、选择性和可靠性四项基本要求，并对不同保护规定有具体的指标。例如对灵敏度规定在最不利条件下的最低灵敏度系数，而在确定整定值时又引入最低安全系数以保证选择性。可见这四项要求往往是相互矛盾的。例如提高整定值的安全裕度就必然要降低灵敏度；而为了提高动作速度，往往要降低安全性等等。这些矛盾应在满足电力系统要求的基础上得到统一。电力系统不断发展，对保护的要求也越来越高。例如，在 220kV 系统出现的初期，线路主保护动作时间为 0.1s 就认为是快速的，而在 500kV 主干线上则要求不大于 30ms。

继电保护技术的困难不仅在于要满足测量的精度，更重要的是在各种复杂的情况下都要能满足相互矛盾的四项要求，一句话：要正确动作，该动则动，不该动则不动。这就向继电保护工作者的智慧提出了严重的挑战。继电保护的正确动作取决于一系列的因素，如保护原理、装置软硬件的设计、产品质量、整定和调试以及运行管理等。本书主要介绍各种保护原理，分析继电器的特性和动作行为，并介绍一些应用上的技术问题。

从保护原理来说最根本的是找到故障的特征，以准确区分各种状态。有了区分就有了选择性和灵敏度，也易于达到快速。在提出保护原理时允许作一些假设，以便从最简单的、

基本的、甚至是理想的条件出发。这些假设的条件虽然不符合实际，但在这些条件下保护也必须能正确动作。这些假设有忽略线路的分布电容、不考虑系统元件阻抗中的电阻分量、认为两侧电源电动势甚至全系统各点电压相等、弱电源侧无电源等。允许作简化假设的另一个原因是由于有些参数的精确数值无法取得，有些参数甚至是变化的，如随温度、运行方式而变化等。又由于不可避免有误差存在，测量不可能十分精确。如仅反应线路一侧的电气量，不可能区分本线末端和对侧母线上的故障。所以距离保护 I 段要留有足够的裕度，不能保护线路的全长。从这个意义上讲，继电保护在技术上是近似的，或者说是模糊的，定性优先于定量。唯其模糊才能安全，也只有模糊才能快速。

当然在提出保护原理进行分析时必须是严格的、精确的，力争达到高指标。例如对电抗继电器要证明它不受过滤电阻影响——在区外故障时不超越，在区内故障都能动作。但在实际使用时一定要留有完全裕度。继电保护总是偏保守的，如电抗继电器要保证在区外故障时一定不超越，其结果必然是降低了区内故障时对过渡电阻的反应能力。另外，在提出原理时以先进的性能为目标，在实际运行时应以满足系统要求为准则。例如对快速主保护若能增加几毫秒的测量时间（不是简单的延时），就能很大地提高安全性。又如仅在单相故障时过渡电阻才可能达到很大的数值，而这种故障一般对系统稳定不构成威胁，只要能保证选择性，完全可由后备保护切除。当然，对这些问题的决定是运行部门的事，但制造厂在产品中应提供选择的可能性。

第一章 电力系统不对称故障的计算

电力系统不对称故障包括不对称短路、断线及串联补偿电容器保护间隙的不对称击穿等。仅在电力系统中某一处出现的不对称故障称为简单不对称故障，在不同地点同时发生的不对称则称为复杂不对称故障。本章讨论不对称故障的计算方法，这是分析研究继电保护的动作行为的基础。

众所周知，在三相对称的条件下，计算可以按单相进行。但在出现不对称后，计算就必须按三相进行。为了简化，通常将 A 、 B 、 C 三相电压和电流分解为对称分量（又称 0、1、2 分量）进行计算。我们将着重介绍这种方法，因它与继电保护原理有密切的联系。此外，在一定条件下直接在 A 、 B 、 C 三相系统中进行计算也是方便的，对此也作适当介绍。

1-1 对称分量（0、1、2 分量）法

为了进行不对称短路的计算，通常将 A 、 B 、 C 三相电压和电流都分解为它们的对称分量。以三相电压为例

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{0A} + \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} \\ \dot{U}_{0B} + \dot{U}_{1B} + \dot{U}_{2B} \\ \dot{U}_{0C} + \dot{U}_{1C} + \dot{U}_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

式中

a ——运算符， $a = e^{j120^\circ}$ ；

$\dot{U}_{0A}$ 、 $\dot{U}_{0B}$ 、 $\dot{U}_{0C}$ —— A 、 B 、 C 三相零序分量电压， $\dot{U}_{0A} = \dot{U}_{0B} = \dot{U}_{0C} = \dot{U}_0$ ；

$\dot{U}_{1A}$ 、 $\dot{U}_{1B}$ 、 $\dot{U}_{1C}$ —— A 、 B 、 C 三相正序分量电压， $\dot{U}_{1A} = \dot{U}_1$ ， $\dot{U}_{1B} = a^2 \dot{U}_1$ ， $\dot{U}_{1C} = a \dot{U}_1$ ；

$\dot{U}_{2A}$ 、 $\dot{U}_{2B}$ 、 $\dot{U}_{2C}$ —— A 、 B 、 C 三相负序分量电压， $\dot{U}_{2A} = \dot{U}_2$ ， $\dot{U}_{2B} = a \dot{U}_2$ ， $\dot{U}_{2C} = a^2 \dot{U}_2$ 。

通常都把 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 、 $\dot{U}_0$ 称为正序、负序及零序电压，实际上它们都是以 A 相为参考相的各序电压。

求解各序分量即对式 (1-1) 求解，解后得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} \quad (1-2)$$

将式 (1-1) 和式 (1-2) 中电压均换成相应的电流就得到 A、B、C 三相电流和正序、负序、零序电流之间的关系。

将 A、B、C 三相系统中的 3 个分量分解为 0、1、2 系统中的 3 个分量，反过来将 0、1、2 系统中的 3 个分量合成为 A、B、C 三相系统中的 3 个分量，在数学上就是不同坐标系中进行线性变换。式 (1-1)、(1-2) 的矩阵给出实现此变换的关系。

为了用对称分量法进行计算，必须知道元件的各序阻抗。假设 A、B、C 三相对称，各相自阻抗为 Z_l ，各相间互阻抗为 Z_m ，则在 A、B、C 坐标系统中有

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_l & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_l & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

将式 (1-1) 中的电压改为电流并代入式 (1-3)，再代入式 (1-2)，则得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_l + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_l - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_l - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

式中 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 ——0、1、2 坐标系统中的零序、正序及负序阻抗。

显然 Z_0 、 Z_1 、 Z_2 和 A、B、C 坐标系统中的自阻抗和互阻抗的关系为

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_l + 2Z_m \\ Z_l - Z_m \\ Z_l - Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_l \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (1-5)$$

A、B、C 坐标系统中的自阻抗和互阻抗也可由各序阻抗表示，因为 $Z_1 = Z_2$ ，故有

$$\begin{bmatrix} Z_l \\ Z_m \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + 2Z_1 \\ Z_0 - Z_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

由此可见，电力系统中任何元件只要在 A、B、C 坐标系统中各相自阻抗相等，各相间互阻抗也相等，在 0、1、2 坐标系统中必然有 $Z_1 = Z_2 \neq Z_0$ 。式 (1-4) 的阻抗矩阵为对角阵，它说明各序分量之间的互阻抗为零，各序分量相互独立。这就是说在对称的三相系统上加正序（负序或零序）电压仅产生正序（负序或零序）电流。

架空输电线路和电缆三相对称，有 $Z_1 = Z_2 \neq Z_0$ 。电抗器（3 个单相的）和电容器三相对称而且各相之间没有互感（ $Z_m = 0$ ），则有 $Z_1 = Z_2 = Z_0$ 。

变压器也有 $Z_1 = Z_2$ ，但它在网络中呈现的零序阻抗与其绕组的接线法有关。只有当变压器某一侧绕组按星形接线且中性点接地时，零序电流才可在该侧流通，在零序等效网络上变压器与其外部系统之间才是连通的。当变压器绕组按星形接线但中性点不接地时，零序电流无法在该侧流通，在零序等效网络上变压器与其外部系统之间是断路的。当变压器

绕组按三角形接线时，零序电流无法在该侧流通但可在三角形接线的绕组间环流，在零序等效网络上变压器与其外部系统之间是断路的，且变压器在该侧对地短接。图 1-1 示出 YN, yn、YN, y 和 YN, d 3 种接线方式变压器的零序等效网络。由 3 个单相变压器接成的变压器组和三相五柱式变压器的零序励磁阻抗和正序励磁阻抗相等，一般在零序网络中都可认为是无限大。三相三柱式变压器的零序磁通只能穿过绝缘介质经变压器的铁壳形成回路，因此零序励磁阻抗小，具体数值与变压器结构有关，一般其标么值为 0.3~1.0。在零序等效网络中一般讲不能把三相三柱式变压器的零序励磁阻抗断开。

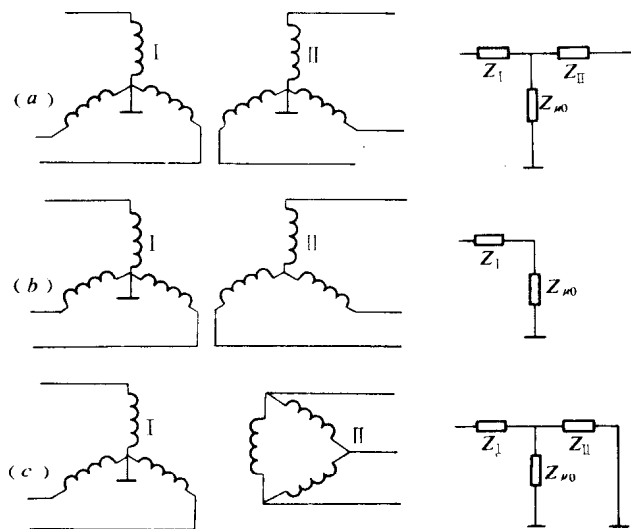


图 1-1 变压器的接线及其零序等效网络图

(a) YN, yn 接线；(b) YN, y 接线；(c) YN, d 接线

发电机是旋转电机，其正序、负序和零序阻抗各不相同。发电机的正序阻抗有次暂态阻抗、暂态阻抗和同步阻抗之分。凸极发电机的纵轴线方向的阻抗和横轴线方向的阻抗又不相同。在分析快速保护时，正序阻抗采取次暂态电抗 X_d'' 。在分析后备保护时则采用同步电抗 X_d ，但应考虑强行励磁的作用。由于负序电流所产生的旋转磁场与转子的旋转方向相反，且发电机转子纵轴线方向和横轴线方向的阻抗不相同，严格地讲负序阻抗与正序阻抗不等而且它本身不是常数。在短路电流的实用计算中，对于汽轮发电机和有阻尼绕组的水轮发电机，一般均采用 $X_2 \approx X_d''$ 。发电机的零序电流所产生的磁通不能穿过转子，零序阻抗和定子漏抗很相近。零序阻抗的数值视定子绕组的型式而异，具有较大的变动范围，如 $X_0 = (0.15 \sim 0.6) X_d''$ 。

电动机的转子是完全对称的，所以无需将其电抗分解为纵轴线与横轴线两个分量。短路后若电动机的端电压下降到很低，则初期电动机可以视为欠励磁的发电机，作为 1 个电源向外供给电流。其正序电抗 X_1 ，即次暂态电抗，可用电动机启动电流标么值的倒数来计算。对于不同型式和功率的电动机，正序电抗的标么值为 0.2~0.35。电动机的负序电抗严

格地讲与正序电抗不同，不过差别不大，实用上都认为和正序电抗相等。但是在分析后备保护时，电动机的正序电抗应为同步电抗，于是正序和负序电抗不再相等。

在实用近似计算中，一般将各种负荷用 1 个综合负荷阻抗代替，以负荷的功率和平均额定电压为基准。综合负荷的正序阻抗的标么值取 1.2，负序阻抗的标么值取 0.35。

虽然发电机和负荷的正序和负序阻抗并不相等，但是在对继电保护的行为进行分析时一般总是认为 $Z_1 = Z_2$ 。

1-2 用对称分量法计算简单不对称故障

简单不对称故障的计算任务首先在于求出故障处的三相电压和电流，共 6 个未知数。用对称分量法进行计算则应求出故障处的各序电压和电流，仍然是 6 个未知数。计算的方法是将故障支路（不对称部分）和系统其余部分（对称部分）分别处理。根据故障支路电压和电流的条件（称为边界条件）可以列出 3 个方程。系统其余部分是对称的，各序电压仅产生相应的各序电流，因此很容易写出系统各序电压的方程。于是总共有 6 个独立方程，正好求解 6 个未知数。

不对称故障可以分为横向不对称故障和纵向不对称故障。前者不对称发生在系统某一点与地之间，后者不对称发生于系统某两点之间。下面就分别讨论横向不对称故障和纵向不对称故障的计算方法^[1]。

一、横向不对称故障的计算

图 1-2 示出系统中某一点 F 处发生横向不对称的一般情况，故障支路中各相阻抗 $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ ，并有接地电阻 R_G 。按此故障支路的边界条件可写出

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{AF} \\ \dot{U}_{BF} \\ \dot{U}_{CF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_A + R_G & R_G & R_G \\ R_G & Z_B + R_G & R_G \\ R_G & R_G & Z_C + R_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{AF} \\ \dot{I}_{BF} \\ \dot{I}_{CF} \end{bmatrix} \quad (1-7)$$

式中 $\dot{U}_{AF}$ 、 $\dot{U}_{BF}$ 、 $\dot{U}_{CF}$ ——分别为 F 点各相对地电压；

$\dot{I}_{AF}$ 、 $\dot{I}_{BF}$ 、 $\dot{I}_{CF}$ ——分别为故障支路各相相电流。

除去不对称的故障支路后系统其余部分都是对称的，于是其中各序分量相互独立。对于每一对称分量分别绘出 1 个网络图，称为序网图，如图 1-3 所示。其中正序网络是有源网络，用 1A 表示，负序和零序网络是无源网络，分别用 2P 和 0P 表示。每一序网有 2 个引出端 F 和 G 。 F 点是故障点， G 点是零电位点。 G 点在正（负）序网络中是中性点，在零序网络中是地。 F 和 G 点之间外接故障支路，我们规定 F 点电位高于 G 点，电流自 F 点流出。这样规定是为了与图 1-2 相符。根据图 1-3 可以写出

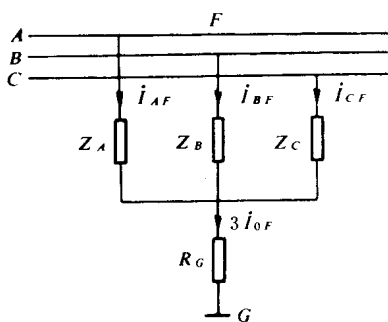


图 1-2 横向不对称故障的一般情况
($Z_A \neq Z_B \neq Z_C$)

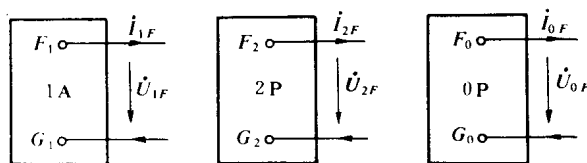


图 1-3 简单横向不对称故障时系统正序、负序及零序网络示意图

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{0F} \\ \dot{U}_{1F} \\ \dot{U}_{2F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{E}_s \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{0FF} & & \\ & Z_{1FF} & \\ & & Z_{2FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{0F} \\ \dot{I}_{1F} \\ \dot{I}_{2F} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

式中 Z_{1FF} 、 Z_{2FF} 、 Z_{0FF} ——正序、负序、零序网络自 F 、 G 两点看进去的等效阻抗；

$\dot{E}_s$ ——正序网络等效电压源的电动势，即故障支路断开时 F 、 G 两点间的开路电压。

Z_{1FF} 是将正序网络中电压源短接、电流源断开后进行计算得到的。因此一般有 $Z_{1FF} = Z_{2FF}$ 。式 (1-7)、(1-8) 共有 6 个独立的方程，因此可以解出 6 个未知数。在求解之前必须将两式中的电量统一用 A 、 B 、 C 坐标系统中的全量或统一用 0、1、2 坐标系统中的对称分量表示。

当用 A 、 B 、 C 坐标系统中的全量表示时，应用式 (1-1)、(1-2) 和式 (1-8) 可得 A 、 B 、 C 坐标系统中的电压方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{AF} \\ \dot{U}_{BF} \\ \dot{U}_{CF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_s \\ a^2 \dot{E}_s \\ a \dot{E}_s \end{bmatrix} - \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_{0FF} + 2Z_{1FF} & Z_{0FF} - Z_{1FF} & Z_{0FF} - Z_{1FF} \\ Z_{0FF} - Z_{1FF} & Z_{0FF} + 2Z_{1FF} & Z_{0FF} - Z_{1FF} \\ Z_{0FF} - Z_{1FF} & Z_{0FF} - Z_{1FF} & Z_{0FF} + 2Z_{1FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{AF} \\ \dot{I}_{BF} \\ \dot{I}_{CF} \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

将式 (1-7) 和式 (1-9) 联立求解，直接求得 $\dot{U}_{AF}$ 、 $\dot{U}_{BF}$ 、 $\dot{U}_{CF}$ 、 $\dot{I}_{AF}$ 、 $\dot{I}_{BF}$ 、 $\dot{I}_{CF}$ 。

计算也可在 0、1、2 坐标系统中进行。为此应用式 (1-1)、(1-2) 和式 (1-7)，可得 0、1、2 坐标系统中的边界条件

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{0F} \\ \dot{U}_{1F} \\ \dot{U}_{2F} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_A + Z_B + Z_C + 9R_G & Z_A + a^2 Z_B + a Z_C & Z_A + a Z_B + a^2 Z_C \\ Z_A + a Z_B + a^2 Z_C & Z_A + Z_B + Z_C & Z_A + a^2 Z_B + a Z_C \\ Z_A + a^2 Z_B + a Z_C & Z_A + a Z_B + a^2 Z_C & Z_A + Z_B + Z_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{0F} \\ \dot{I}_{1F} \\ \dot{I}_{2F} \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

于是将式 (1-8) 和式 (1-10) 联立求解, 可求得 $\dot{U}_{1F}$ 、 $\dot{U}_{2F}$ 、 $\dot{U}_{0F}$ 、 $\dot{I}_{1F}$ 、 $\dot{I}_{2F}$ 、 $\dot{I}_{0F}$ 。

通常将图 1-3 中 3 个序网按式 (1-10) 的边界条件连接起来, 组成复合序网图 (如图 1-4 所示), 然后按照复合序网图进行计算。图 1-4 的复合序网图中各序网之间是通过变比为 $1:1$, $1:a^2=a:1$ 或 $1:a=a^2:1$ 的理想互感器 (其励磁阻抗为无限大) 连接起来的。这些互感器两侧的电压和电流大小相等, 但变比为 a (或 a^2) 的互感器两侧电压和电流的相位均移动了 120° (或 240°)。

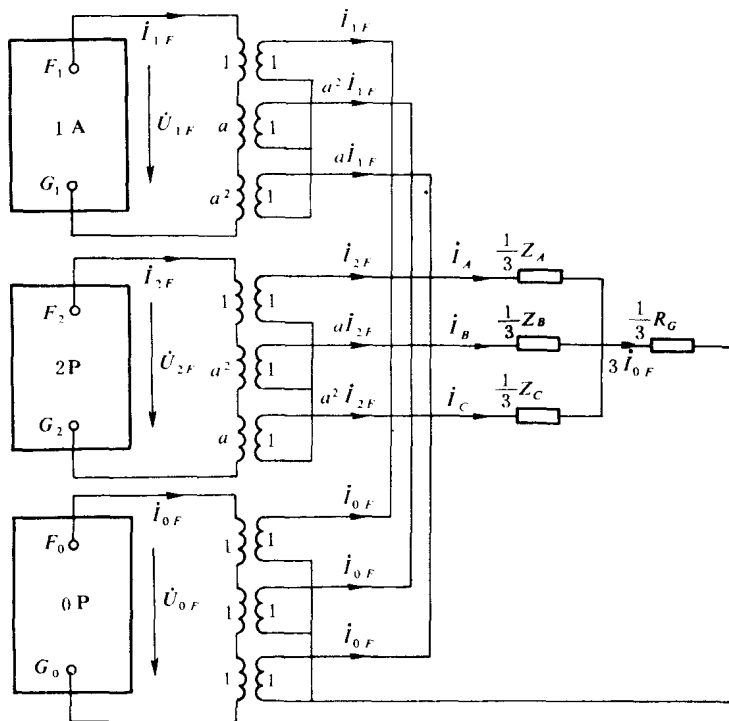


图 1-4 简单横向不对称故障的复合序网图

当不对称支路中有两相阻抗相同时, 以特殊相为对称分量的参考相作出的复合序网图, 在各序网之间可以不用互感器直接连接起来。

兹以 $Z_B=Z_C$ 为例。因为 A 相阻抗 Z_A 与其它两相不同, 取 A 相为参考相。为了计算方便将不对称支路中的阻抗绘出, 如图 1-5 (a) 所示。于是仅在 F' 、 G' 两点之间出现不对称。对于 $F'G'$ 支路有 A 相阻抗为 Z_A-Z_B , B 、 C 两相阻抗为零。 F' 、 G' 两点间的电压: A 相为 $(Z_A-Z_B) \dot{I}_{AF}$, B 、 C 两相为零。相应地在 0、1、2 坐标系统中有

$$\dot{U}_{1F'} = \dot{U}_{2F'} = \dot{U}_{0F'} = \frac{1}{3} (Z_A - Z_B) \dot{I}_{AF} \quad (1-11)$$

按式 (1-11) 的边界条件, 可绘出复合序网图, 如图 1-5 (b) 所示, 因为在接地电阻 R_G 中流过的是 3 倍零序电流 $3 \dot{I}_{0F}$, 故在零序网络中相应的电阻值应增大 3 倍。在零序网络中仍是 G_0 点的零序电压为零。

