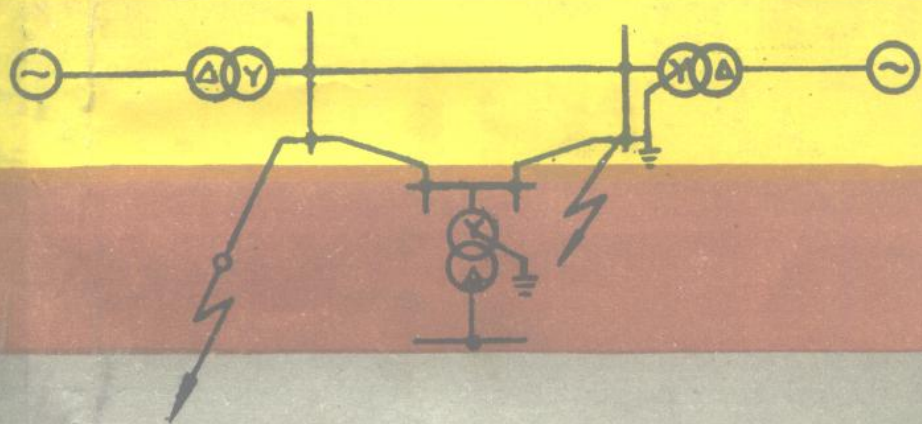


电力系统不对称状态下 电气量的计算



水利电力出版社

电力系统不对称状态下 电气量的计算

[苏]C.Б.罗谢夫 A.Б.奇尔宁

贺家李 译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是论述应用各种分量系统进行不对称状态下电流和电压计算方面的基础著作, 这些不对称状态有: 短路、断相、故障和不对称的复杂类型, 书中还给出了利用电子计算机的解法。在1971年曾出版了《在电力系统复故障情况下继电保护所需电气量的计算基础》一书, 而本书对此问题又做了进一步地阐述。

本书适用于从事电力系统设计、运行和研究工作的科技人员参考, 也可供高等学校的学生阅读。

С.Б.Лосев А.Б.Чернин

Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем
МОСКВА ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1983

电力系统不对称状态下电气量的计算

苏联 С.Б.罗谢夫 А.Б.奇尔宁

贺家李

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷

*

787×1092毫米 32开本 19.875印张 441千字

1989年9月第一版 1989年9月北京第一次印刷

印数0001—3910册

ISBN 7-120-00858-7/TM·236

定价12.70元

译者序

本书是现代化高压电力系统在复杂不对称状态下电气量计算理论与方法方面的一本专著。它总结了近些年来苏联和其他国家在此领域研究工作的成就，对解决高压尤其是超高压电力系统各种复杂不对称状态的分析与计算有指导意义。两位作者都是研究电力系统故障分析的先驱者，在理论研究和解决实际设计计算问题方面作出过巨大贡献。

A·B奇尔宁很早就研究非全相状态。他在1952年出版的《电力系统非全相状态下的短路》一书，已为我国电力系统的科技人员所熟知，曾经是我们进行复故障计算的唯一参考书。1963年又出版了他的《电力系统非全相状态下电气量的计算和继电保护动作行为》一书。本书的部分章节是他在这方面的最后论述。C·B·罗谢夫长期从事超高压电力系统故障及继电保护行为分析的研究。他在苏联第一条古比雪夫—莫斯科400kV长距离输电线故障暂态过程的计算及其对继电保护的影响方面作了巨大的卓有成效的工作。近些年来，他研究了超高压电力系统复杂不对称状态计算的非对称分量法、三相等效网络法、两相分量法及其他特殊的分量系统。他还研究了超高压系统故障计算的特殊问题，如不完全换位问题、相分裂导线断裂造成的不对称问题、架空地线不在每个杆塔处接地问题及导线机械振动引起的不对称问题等。在本书中他对这些问题都作了论述和分析，反映了他在这方面的研究成果。

我国电力系统正在不断扩大，输电电压等级不断提高，

电气化铁道等不对称负荷的比重也不断增大，各种复杂不对称状态的出现将成为电力系统的严重问题。因此，这本书对从事电力系统设计、运行、故障分析和继电保护方面工作的科技人员无疑都有很高的参考价值。

本书译稿经陈毓瑛同志精心整理，在此表示感谢。

译者

1986年

序 言

本书论述现代电力系统，首先是电压在110kV及以上的系统在不对称状态下电流和电压的计算方法。这些状态可以短期存在，也可长期存在。短期存在的不对称状态，一般是由于短路的发生和随后的切除、断路器和其他操作电器的按相切除和投入等引起的。另外，还可能发生复故障状态（短路和断线同时发生），例如在超高压线路上广泛采用的单相自动重合闸（ОАПВ）、在单相短路时的工作周期内以及在纵向电容补偿（УПК）安装处附近短路情况下个别相电容的自动短接。

长期不对称状态存在于：当系统的个别元件按非全相工作（例如线路和电力变压器组的按相检修和故障相的按相切除）；当出现有大的不对称负载（牵引、电炉和其他）；当元件相参数经常不同（例如不换位线路）；当应用本身为不对称元件的装置使状态对称化等情况。应指出，必须考虑到短路不仅可能发生于长期不对称状态，也可发生于短时的不对称状态下，例如在ОАПВ周期中断电间隔的非全相状态，此状态可总共存在几秒钟。

本书中所讨论的方法首先预计用于继电保护和系统自动装置（P3和A）的目的。因此，特别注意了伴有短路和操作的不对称状态中电气量的计算。为了系统地阐明本题目的基本问题，在本书的第一部分中简单地叙述了在短路和非全相状态下应用电流和电压对称分量进行计算的基本情况。其次，讨论了简单电网中两处同时发生的不对称（短路、断线）情况

下电气量计算的问题。举出了具有为调压而设的复杂变压器耦合的电网中和具有不对称参数的输电线上短路电流的计算方法。于此，讨论了在假设网络元件具有线性特性的情况下，工频电流和电压的计算问题。

对于为得到个别课题的最简单解法而应用各种分量系统的问题给予了很大的注意，而对继电保护领域尤其重要的是解答要很清晰。属于这些分量系统的，除了对称分量外，还有非对称分量、相量以及特殊的三相和双相分量。在很多情况下，应用由两种不同系统（例如相量和非对称分量）结合起来而构成的混合网络可能最为有利。

在继电保护和自动装置的设计运行中，对于复杂电力系统要进行很多不同的、不对称状态下电气量的大量计算。因此，对于用电子计算机求解给予了很大的注意。电子计算机不仅大大地提高了这些计算的效率，而且在很多情况下可能是进行这种计算的唯一现实的手段。特殊的复杂不对称状态问题的解答，一般以等效网络的形式得到。这允许应用计算故障时电气量的广为流传的通用程序进行计算，消除了对于一些局部问题编制单独程序的必要性。为了得到一个完整概念，书中叙述了应用电子计算机进行电气量计算方法和算法的基础。

在书中也讨论了应用直流计算台和以电阻组成的交流计算台进行复故障自动计算的问题。此外，举出了简单网络中两处同时发生不对称状态的计算公式，允许这些公式不用上述的计算手段来完成计算。

考虑了在不对称状态下继电保护动作行为的一系列问题。为了说明最重要的情况给出了数字算例。

书中反映了作者们近些年来在动力系统研究院所进行的

新的研究工作，以及对前已出版的《在电力系统复故障状态下继电保护所需电气量的计算基础》一书中个别章节的加工和补充。

本书第一章至第三章，§ 8.1至§ 8.5以及有关这些章的附录为А·Б·奇尔宁编写；第四章至第七章、第九章、第十章及其附录以及§ 8.6为С·Б·罗谢夫所写。在А·Б·奇尔宁去世后，对手稿的整理和出版的准备工作由С·Б·劳谢夫完成。

技术科学博士、教授М·Л·列维斯坦在评阅本书时给出了可贵的指示。В·Г·浦劳特尼可夫在本书的编辑中提出了有益的建议和意见，并和他一起写出了§ П9.Г。对于本书的所有意见和希望请寄动力核能出版社，地址为113114，莫斯科，М—114，ШЛЮЗОВАЯ НАБ., 10.

С·Б·罗谢夫

目 录

译者序

序 言

第一章 用对称分量法计算电流和电压的一般原理..... 1

- 1.1 对称分量法简介 1
- 1.2 等效网络构成的一般原理 2
- 1.3 变压器和自耦变压器的参数和等效网络 10
- 1.4 架空输电线的纵向阻抗 19
- 1.5 长线路的横向电容, Π 型和T型等效网络 27
- 1.6 双回线路的零序等效网络 35
- 1.7 综合负载的近似计算 48

第二章 藉助对称分量进行网络中一点和两点短路的计算 49

- 2.1 一点短路情况下的基本计算公式 49
- 2.2 Y/Δ -11连结的变压器两侧的电流和电压 60
- 2.3 关于在各发电机电势幅值和相位摆开的情况下确定短路后任意瞬间电流的一些提示 63
- 2.4 两点短路时电流和电压的计算 65
- 2.5 算例 76

第三章 用对称分量法进行非全相状态下的短路计算 85

- 3.1 非全相状态下的计算公式 85
- 3.2 在两端供电线路上短路与断线同时发生情况下电流的计算公式 99
- 3.3 在复杂网络中某些短路伴随断线状态的计算 108
- 3.4 算例 113

第四章 用对称分量法进行复杂不对称状态计算的

一般关系式	119
4.1 概述	119
4.2 在短路和断线同时发生时的复合等效网络	120
4.3 不对称的三相静态元件	129
4.4 用计算公式确定复杂不对称状态下电气量的 一般情况	137
第五章 用非对称分量进行复杂不对称状态的计算	158
5.1 概述	158
5.2 在短路和断线同时发生的情况下, $xy0$ 分量的 复合等效网络	170
5.3 应用 $xy0$ 分量时的不对称三相静态元件	179
5.4 在短路和断线同时发生情况下 $rs0$ 分量的复合 等效网络	184
5.5 在“网络分析器”式的直流计算台上计算 复故障的特点	196
第六章 用相坐标进行复杂不对称状态的计算	201
6.1 概述	201
6.2 电网元件的三相等效网络	202
6.3 按三相等效网络计算的特点	225
6.4 应用相坐标和分量系统的混合网络	236
第七章 用特殊的分量系统进行不对称状态的计算	243
7.1 概述	243
7.2 用 $K1$ 分量进行中性点接地电网中短路接地时 距离测量元件的分析	245
7.3 分量 $K1.1$ 用于非全相状态下的短路计算	281
7.4 用两相分量进行有分支线路非全相状态下短路的 计算	293
7.5 在特殊结构的双回线路上, 为计算复杂不对称 状态而将六相分量和三相分量相结合形成的	

混合网络的应用	312
第八章 具有复杂变压器耦合的电路中短路计算	
的特殊问题	333
8.1 概述	333
8.2 有纵向调压的附加变压器网络中的短路计算, 附加变压器接于双绕组变压器高压绕组中性 点侧出线端	334
8.3 接于自耦变压器公共绕组中性点侧出线端 的纵向调压用附加变压器网络中的短路计算	343
8.4 在接于三绕组变压器高压或中压绕组中性点侧出 线端的纵向调压附加变压器网络中的短路计算	359
8.5 在应用改变变比装置进行负荷下调压的网络中 的短路计算	362
8.6 具有对变压器和自耦变压器进行纵-横向调压 的附加变压器网络中的短路计算	369
第九章 超高压线路复杂不对称状态计算的特殊	
问题	382
9.1 概述	382
9.2 对于具有不完整换位周期线路的某些关系式	883
9.3 无完整换位周期线路上的继电保护的某些问题	396
9.4 在具有分裂导线线路上故障计算的特点	408
9.5 架空地线按非传统方式架设情况下计算的特点	420
9.6 在长距离输电线上短路电弧熄灭时电气量的计算	428
第十章 应用电子计算机进行复杂电网不对称状态的	
计算	438
10.1 概述	438
10.2 借助于节点阻抗矩阵 Z ,进行短路的计算	444
10.3 借助于节点导纳矩阵 Y ,进行短路的计算	417
10.4 复杂不对称状态计算的特点	500

附录

附录 II 1	当所有元件化归同一电压级时, 对不同电压 的平行输电线列出零序电压降方程的特点	517
附录 II 2	非对称分量系统	518
附录 II 3	对中相 B 对称线路的单位长相参数	544
附录 II 4	在混合网络中变压器元件的基本关系式	546
附录 II 5	特殊的三相分量系统	552
附录 II 6	改进的对称分量系统	562
附录 II 7	两相分量系统	571
附录 II 8	变压器电路的关系式	578
附录 II 9	应用电子计算机进行继电保护和自动装置 计算的某些问题	583

第一章 用对称分量法计算电 流和电压的一般原理

1.1 对称分量法简介

为了计算三相系统中的不对称电压和电流，可以将这些量分解成三个分量。在本书的第二章至第七章，详细分析了各种不同的分量系统。此处给出对称分量系统的一般概念，这种分量系统将相量分解成正序、负序和零序三个分量，它广泛应用于三相系统中一点不对称状态的计算（图1.1）。相量（ $\dot{F} = \dot{U}, \dot{I}$ ）与对称分量的关系如下：

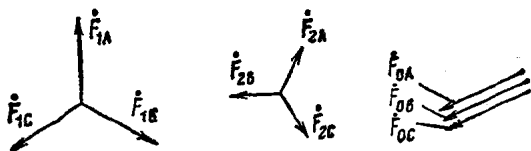


图 1.1 三相电气量的对称分量

$$\begin{Bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{F}_1 \\ \dot{F}_2 \\ \dot{F}_0 \end{Bmatrix} \quad (1.1)$$

式中

$$a = 1 \angle 120^\circ; \quad a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

(1.1) 式对 $\dot{F}_1$ 、 $\dot{F}_2$ 、 $\dot{F}_0$ 的解具有如下形式：

$$\begin{Bmatrix} \dot{F}_1 \\ \dot{F}_2 \\ \dot{F}_0 \end{Bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{F}_A \\ \dot{F}_B \\ \dot{F}_C \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

在(1.1)和(1.2)式中取A相为基准相,对此相进行计算。可对一相作出正序、负序和零序网络,这些等效网络用各元件的相应的正序、负序和零序阻抗表征。对于静止元件,正序和负序阻抗相同,而对于旋转电机则不同。应该指出,电网中所有元件三相对称的条件保证了对称分量各序网之间的独立性。

1.2 等效网络构成的一般原理

为了借助于对称分量法进行计算,可应用各序的等效网络。原始网络一般具有变压器耦合。一种方法是,将不同电压等级中元件的参数归算到取作基本的电压级,从而消除上述耦合。这样,可计算出基本电压级的电流和电压,而其它电压级中电流和电压的实际值可根据变压器的变比换算得出。另一种方法是,将变压器耦合保留在等效网络中。于此,不同电压级中真正的(本来的)电流和电压量都可直接求得。下面讨论这两种解法的特点。

A.按将所有元件归算到同一电压级的等效网络进行计算^[1] 电压(电动势)、电流和阻抗可用两种单位制表示——有名制或标么制。这两种方法的精确度相同并导致相同的结果。但在某些个别情况下,用这种或那种方法可能比较方便。为了将用有名制表示的某些量准确地归算到同一电压级,应采用已知的电压(电动势)、电流和阻抗的关系式。绕组按Y/△联结的变压器应化成Y/Y联结。对于被多个串联联结的、变比为 $n_1, n_2, \dots, n_N$ 的变压器与基本电压级隔开的元件的阻抗 Z 和电动势 E (图1.2)可按表1.1中的公式(1)一(3)进行归算。可选取一假想电压级,如图1.2中

虚线所示，而将所有元件的阻抗归算至该级。

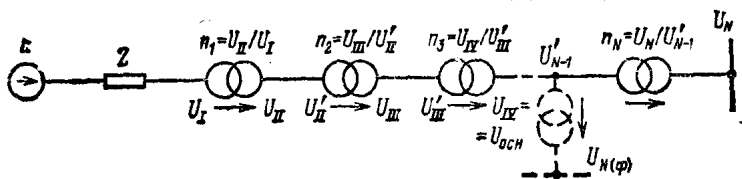


图 1.2 将电动势 E 和阻抗 Z 归算至基本电压级

按这种形式构成的含有电动势和阻抗的等效网络可以确定电流和电压。只有对于取作基本的电压级，求出的电流和电压是其真值。网络中其它电压级中电流和电压的真值可根据变压器的变比求出。

当应用标么值、按精确归算的方法进行计算时，对于选取的基本电压级引入基准量 U_δ 、 I_δ 和 S_δ 。于此，应先将用有名值给出的电动势和阻抗归算至基本电压级，然后将其按所选定的基准量表示成标么值。在表 1.1 中给出了公式 (4) — (6)，用以在按标么单位制计算时，将电动势和阻抗归算至基本电压级。

在作出等效网络并找出归算至基准条件下的综合阻抗 $Z_{\Sigma(\delta)}$ 和电动势 $E_{\Sigma(\delta)}$ 后，可求出短路点的电流 $I_{K(\delta)}$ 。将短路点的标么值电流分配于网络中，即可找出网络各区段的电流 $I_{(\delta)}$ 。基本电压级的实际电流可根据基准电流 I_δ 求出 ($I = I_{(\delta)} I_\delta$)，而其它电压级的实际电流可根据基准电流 I'_δ 求出 ($I = I_{(\delta)} I'_\delta$)。 I'_δ 等于按变压器变比换算而得的基准电流。

如用平均变压比近似归算至同一电压级时，计算可以简

表 1.1

以有名制表示	以标么制表示
按实际变比计算	
$\dot{E} = n_z E$ (1)	$E_*(s) = n_z \frac{E}{U_s} = n_z \frac{U_{nzs}}{U_s} E_{*(nzs)}$ (4)
$\dot{Z} = n_z Z$ (2)	$Z_*(s) = n_z \frac{\sqrt{3} I_s}{U_s} Z = n_z \frac{S_s}{U_s^2} Z$ (5)
$\dot{Z} = n_z \frac{U_{nzs}}{\sqrt{3} I_{nzs}} Z_{(nzs)}$ $= n_z \frac{U_{nzs}^2}{S_{nzs}} Z_{(nzs)}$ (3)	$Z_*(s) = n_z^2 \frac{U_{nzs}}{U_s} \frac{I_s}{I_{nzs}} Z_{(nzs)}$ $= n_z^2 \left(\frac{U_{nzs}}{U_s} \right)^2 \frac{S_s}{S_{nzs}} Z_{(nzs)}$ (6)
按平均变比计算	
$\dot{E} = \frac{U_{s,p}}{U_{s,p}} E$ (7)	$E_*(s) = \frac{E}{U_{s,p}} = \frac{U_{nzs}}{U_{s,p}} E_{*(nzs)}$ (10)
$\dot{Z} = \left(\frac{U_{s,p}}{U_{s,p}} \right)^2 Z$ (8)	$Z_*(s) = \frac{S_s}{U_{s,p}^2} Z = \left(\frac{U_{nzs}}{U_{s,p}} \right)^2$ $\times \frac{S_s}{S_{nzs}} Z_{(nzs)}$ (11)
$\dot{Z} = \left(\frac{U_{s,p}}{U_{s,p}} \right)^2 \frac{U_{nzs}}{\sqrt{3} I_{nzs}} Z_{nzs}$ $= \left(\frac{U_{s,p}}{U_{s,p}} \right)^2 \frac{U_{nzs}^2}{S_{nzs}} Z_{(nzs)}$ (9)	

符号说明：电气量上面的圆圈表示归算后值；

电气量下面的星号表示以标么值表示的量；

n_z ——综合变比系数 ($n_z = n_1 n_2 \dots n_N$)；

E, U ——相间电动势和电压；

U_s, I_s, S_s ——基本电压级所选定的基准量 ($S_s = \sqrt{3} U_s I_s$)；

$U_{nzs}, I_{nzs}, S_{nzs}$ ——额定值 ($S_{nzs} = \sqrt{3} U_{nzs} I_{nzs}$)；

$E_*(s), Z_*(s); E_{*(nzs)}, Z_{*(nzs)}$ ——(基准的和额定的)标么值电动势和阻抗；

$U_{s,p}$ ——元件所在级的平均额定电压；

$U_{s,p,s}$ ——选作基本级的平均额定电压。

化。为此，对每一电压级应确定一个平均额定电压，即，1150kV、750kV、515kV、400kV、340kV、230kV、154kV、115kV、37kV、10.5kV、6.3kV、3.15kV^[1]。变压器的空载电压取为等于平均额定电压，因此，不论是升压或是降压变压器，其变比都等于上列相应的平均电压之比。在归算至同一电压级的公式中的各串联连接变压器(图1.2)平均变比之积将采取下列简单形式

$$n_{cP1}n_{cP2}\cdots n_{cPN} = \frac{U_{cPII}}{U_{cPI}} \frac{U_{cPIII}}{U_{cPII}} \cdots \frac{U_{cPN}}{U_{cP(N-1)}} \\ = \frac{U_{cPIs}}{U_{cPI}} \quad (1.3)$$

式中 U_{cPII} ——被换算元件所在电压级的平均额定电压(对于一般情况，用 U_{cP} 表示)；

U_{cPIs} ——选作基本级(N)的平均额定电压。

在表1.1中给出了公式(7)一(9)，用以在按有名制计算时将参数归算至基本级；还给出了公式(10)和(11)，用以在按标么制计算时将参数归算至基本级。如果取所考虑的元件的额定电压 $U_{n.n}$ 等于所在电压级的平均额定电压 U_{cP} (这样假设具有足够的精确度)，则表1.1中的公式(7)一(11)可以简化。可以看出，按平均变比进行归算可使计算大大简化，尤其是当元件参数用标么制表示时。然而，这种近似归算将带来某些误差，只应在不要求高精度的计算中采用。

当需要计算一个大系统的一小部分的电气量时，可以对系统的其余部分作近似考虑。于此，可从两部分连接处节点的三相短路电流 I_K 和相应的功率 S_K 出发进行归并。在按有各单位制计算时，系统的综合阻抗为