

电力系统的数学模拟

〔苏联〕Д·И·阿扎里也夫 著

韩禎祥 戴熙杰 译

2.18
7
3965

中国工业出版社

本书介绍现代电力系统及其用数学模拟方法进行研究的一般知识，数学模拟方法的主要发展阶段及其在电力系统设计和运行中的实际应用，此外还介绍电力系统各种类型的模型，如系统的电阻模型，系统的交流模型，其中包括有自动作用的发电厂和负荷、自动记录运行方式和过程的动态模型，连续作用计算机。

书中还简述了数字计算机的基本元件及其在电力系统计算中的应用。

本书供从事电力系统设计、运行和研究工作的工程技术人员，以及高等学校有关专业的教师阅读。

Д.И.Азарьев

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ—1962

* * *

电力系统的数学模拟

韓禎祥 戴熙杰 译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $12^{3/4}$ ·字数274,000

1965年1月北京第一版·1965年1月北京第一次印刷

印数0001—3,890·定价(科六)1.60元

*

统一书号: 15165·3500(水电-456)

序 言

近来常用下列方法来进行现代电力系统的研究：在实物上(即实际的系统)进行试验，利用动力系统的物理模拟，以及各种在不同程度上实现动力系统数学模拟或数学计算的装置。

B.A. 維尼柯夫所著“相似理论和物理模拟在电工技术中的应用”(苏联国立动力出版社1949年出版)和 B.A. 維尼柯夫和 A.B. 依万諾夫-斯莫連斯基合著“电力系统的物理模拟”(中译本，中国工业出版社出版)是叙述电力系统物理模拟的书。

到目前为止，仅在个别文章中讨论过有关动力系统数学模拟的问题。为了弥补这个空白，作者认为不仅应向读者介绍数学模拟的现状，而且也应简要地介绍一下它的发展情况。

电力系统的动态(自动)模型是这个模拟领域中的最新成就。根据作者的意见，这种模型将会得到很广泛的应用，并逐渐代替直流计算台和交流静态模型。但是，由于目前交流静态模型还很广泛地应用着，而且直流模型较动态模型简单，在很多情况下还将被采用；所以作者认为有必要向读者介绍各种类型的交流静态模型和直流模型。这样做的合理性还因为动态模型中的线路、变压器和动力系统接线图中的其他无源元件，也可用和静态模型中同样的元件来复制。

作者认为也应介绍某些关于用快速数字计算机来进行电力系统计算的方法。因为这种动力系统的数学计算方法目前已得到应用，今后，在很多情况下也将被采用。

作者向火电设计院稳定和模拟实验室及实验工场的全体成员表示感谢。在这里，长时期以来在作者的领导下进行了本书中所叙述的电力系统直流和交流静态模型，以及动态模型的设计和运行工作。

作者感谢本书评阅人科学技术博士、教授 B.A. 維尼柯夫对本书内容提出的宝贵意见；感谢科学技术副博士、副教授 Л.А. 茹科夫对本书原稿的仔细校阅；此外，工程师 X.И. 奥尔洛夫(审阅第一、二和三章)，副教授 И.И. 索科洛夫(审阅第四章)，科学技术博士 B.И. 戈鲁西金和 Л.В. 楚盖尔尼克(审阅第五章)，对本书个别章节进行了审阅并提出意见，作者也在此表示感谢，这些意见作者已尽量予以考虑。

目 录

序 言

緒 論	電力系統數學模擬發展的基本階段	1
第一章	使用最簡單模型的電力系統模擬	13
1-1	通用的電力系統電阻模型及其改進的方法	13
1-2	專用的電力系統電阻模型	21
1-3	使用電阻模型的短路電流及有功和無功功率潮流的計算	23
第二章	使用交流靜態模型的電力系統模擬	31
2-1	電力系統元件模擬的基本問題	31
2-2	電力系統靜元件的模擬	37
2-3	負荷的靜態和動態特性及其在交流靜態模型上的复制	39
2-4	同期電機的模擬	51
2-5	蘇聯製造的交流靜態模型，它們的特點及技術特性	52
2-6	國外使用的電力系統靜態模型的類型	72
2-7	使用交流靜態模型時的計算方法	83
2-8	改進交流模型的途徑	97
第三章	電力系統模擬的新方法 複雜電力系統的動態模型	99
3-1	同期電機電子管型和機電型模型	99
3-2	電能用戶電子管型和機電型模型	118
3-3	電力系統的通用和專用動態模型	121
3-4	電力系統模型的穩態運行方式和暫態過程參數的自動記錄	127
3-5	電力系統動態模型的应用	130
第四章	電子模擬計算機在電力系統計算中的应用	133
4-1	連續作用計算機的基本元件	133
4-2	使用連續作用計算機的電力系統元件的模擬	142
4-3	使用連續作用計算機的電力系統的模擬	156
第五章	自動數字計算機及其在電力系統計算中的应用	162
5-1	自動數字計算機的特點及其基本元件	162
5-2	使用快速數字計算機的電力系統穩態運行方式的計算方法	168
5-3	使用數字計算機的電力系統動態和靜態穩定計算方法	180
附 錄		191
文 獻		195

緒論 電力系統數學模擬發展的基本階段

沒有電力系統運行方式的正確計算和對其中所發生的物理過程的定量分析，就不可能有合理的電力系統發展規劃、有效的運行、設備工作的可靠性和對用戶供電的不間斷性。

即使是不大的電力系統的運行方式計算，也是很複雜的，因為系統中的每一個元件（發電廠、變電所或輸電綫）的運行方式在一定程度上都與其他元件的運行方式有關。隨着電力系統的發展，由於動力系統電氣結綫圖的日趨複雜，對計算準確性的要求日益提高以及必須計及更多的對計算結果有影響的因素，因而電力系統的計算就越來越複雜。

在現代動力系統中有幾十個發電廠和幾百個變電所用電網聯在一起並列運行着。這樣巨大功率的系統，尤其是聯合動力系統的計算是非常複雜的，而且要解決的問題很多，為了解決這些問題必須快速而正確地完成各種計算。這些問題是：例如，決定系統正常和故障運行方式時的有功和無功功率潮流；發電廠間負荷的經濟分配；估計靜態和動態穩定；決定短路電流和動態過電壓；研究例如同期電機勵磁調節器、頻率和功率調節器、自動重合閘、振蕩時的系統解列裝置等自動裝置工作的有效性。

這些問題，特別是與暫態現象有關的問題的數學研究，是很困難的，而產生這些困難的原因是：把許多發電廠和電能用戶聯合成並列運行的現代動力系統的網絡配置的複雜性，以及用來表示系統運行方式的一部分方程式的非綫性。

即使在最簡單的系統中，發電機工作於電壓不變的母綫，其同期發電機轉子的相對運動方程式也沒有一般解：

$$T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_T - P_r, \quad (\text{B-1})$$

$$\text{式中 } P_r = \frac{E_d U}{x} \sin \delta;$$

P_r ——原動機發出的功率。

但是，這一方程式可以很簡單地用數值積分法來求解，電動勢 E_d 不是恒定值時也可以求解。

在具有三個有限功率發電機的系統中，求解類似的問題就很費力。在這種情況下，發電機發出的功率決定於下列方程式組（B-2）：

$$\left. \begin{aligned} P_{r1} &= E_{d1}^2 y_{11} \sin \alpha_{11} + E_{d1} E_{d2} y_{12} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) \\ &\quad + E_{d1} E_{d3} y_{13} \sin (\delta_{13} - \alpha_{13}); \\ P_{r2} &= E_{d2}^2 y_{22} \sin \alpha_{22} + E_{d2} E_{d1} y_{21} \sin (\delta_{21} - \alpha_{21}) \\ &\quad + E_{d2} E_{d3} y_{23} \sin (\delta_{23} - \alpha_{23}); \\ P_{r3} &= E_{d3}^2 y_{33} \sin \alpha_{33} + E_{d3} E_{d1} y_{31} \sin (\delta_{31} - \alpha_{31}) \\ &\quad + E_{d3} E_{d2} y_{32} \sin (\delta_{32} - \alpha_{32}), \end{aligned} \right\} \quad (\text{B-2})$$

式中 $y_{11}, y_{12}, y_{13}, y_{22}, y_{23}, y_{33}, \alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{13}, \alpha_{22}, \alpha_{23}, \alpha_{33}, \delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{23},$

E_{d1} , E_{d2} , E_{d3} ——变量。

当考虑电机的绝对转速变化时，问题变得更加复杂。此时由于调速器的作用，在计算中必须认为原动机所发出的转矩是变量。同样，由于系统频率的变化，线路、变压器、电抗器等阻抗也应该是变化的。

不难看出，即使在具有三个发电厂的系统中，要在分析计算中考虑各个发电机的转速也很费力。用这种方法来计算具有很多发电厂的系统，实际上是不可能的。

系统静态稳定的分析计算会更复杂些。这里除了纯粹计算性的困难以外，还加上复杂系统中确定导数 $\frac{\partial P}{\partial \delta}$ 或 $\frac{\partial Q}{\partial U}$ 时先决条件的假定性（在实际计算中一般根据这些导数的符号来判断系统的稳定和不稳定），以及考虑计算中的重要因素，如系统频率变化和自摇摆等的复杂性。

不使用减轻计算工作的工具，要想解决任何与分析现代电力系统运行方式有关的问题是不可能的。随着动力系统的发展和复杂化，解答的不准确性和由此而必须采用的措施，如很大的储备系数或经济上非最佳的系统运行方式，将导致很大的物质消耗；即使是计算中的相对误差值不大，也是如此。

在动力系统发展的第一阶段，一般不发生系统静态和动态稳定或负荷分配问题，或者是这些问题没有很大的实际意义。短路电流的计算却曾是一个很重要的问题，而且它随着系统的发展程度变得越来越复杂。为了简化这类计算，曾制造了第一批动力系统计算模型，这种模型随后获得很大推广。

最初，这种模型是很简陋的装置（图 B-1），是用电阻和连接导线来复制被研究系统的接线图，将直流电源电压加到接线图上，并用电压表和电流表来测量系统各环节的电压

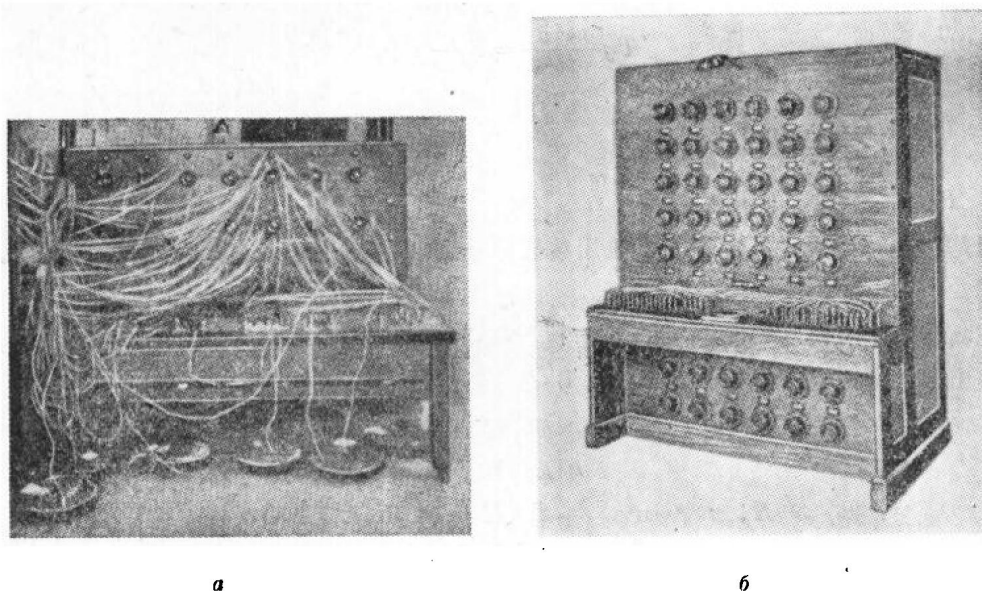


图 B-1 最初的电力系统电阻模型（短路电流计算台）

a—1916年；b—1918年

和电流〔見文献B-1, B-2〕。

直到現在还应用着类似的、但經過改进了的装置。它們有很多过时的或者不正确的名称：短路电流計算台或屏，直流計算台，电阻台，直流計算模型等。这种装置虽然不能完整地模拟电力系统，但是仍能在仅用电阻所能达到的程度上来模拟电力系统。目前，它們不仅用来計算短路电流，也用来計算系統中的功率潮流。所以，在本书中称这种装置为电力系统电阻模型，根据电源性质的不同，可以用直流或交流电源。假如模型是用于特定的动力系统，那就称作专用模型；可以用于任何动力系统的模型，称作通用模型。

可以用电力系统直流电阻模型来計算短路电流，这是因为发电机、变压器、电抗器以及高压綫路等基本上是感抗性的。所以，忽略系統这些元件的电阻，而用电阻来代表电抗，那末由于这种簡化和不考虑发电机电势間相位差而引起的誤差是不大的。例如，为了确定短路电流，这样的誤差是完全允許的。

为了确定短路电流而进行的动力系统模拟归結为：将所有发电机用同一电动势 E 来代替，电气結綫图用模型的电阻来代表，电阻的值等于原系統的电抗值，并与系統相应的元件同样地相互联接起来。

在最初的模型中，取所有发电机的电动势为同一数值，而模型仅用来将系統发电机到短路点的所有联系綜合起来，并求出系統的等值电抗。

可用电流表直接在模型上的短路点测量短路电流。

在模型上也不难量出被复制的动力系統各环节的电压和电流。

福尔第斯寇在1918年提出的对称分量法促进了广泛应用电阻模型来进行短路电流計算，这个方法能很簡單地确定不对称短路时的电流。

在仅有电阻箱的电力系统模型上，原則上也可考虑系統阻抗的复合特性。

实际电网中任一阻抗上的电压 U ，可用两个相位差 90° 的电压之和来表示：

$$U = u_1 + ju_2 = (I_1 + jI_2)(r + jx) = (I_1r - I_2x) + j(I_2r + I_1x).$$

由上式得到：

$$u_1 = I_1r - I_2x,$$

$$u_2 = I_2r + I_1x,$$

以及

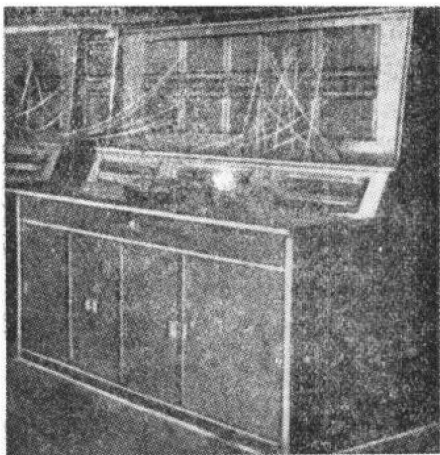
$$\frac{u_1}{I_1} = R_1 = r - x \left(\frac{I_2}{I_1} \right),$$

$$\frac{u_2}{I_2} = R_2 = r + x \left(\frac{I_1}{I_2} \right).$$

这样就可 在模型的两个結綫图上来复制阻抗。在一个結綫图上用电阻 R_1 来复制系統中所討論的元件；而在另一个結綫图上用电阻 R_2 来复制，这个結綫图上的电流和电压与第一个的差 90° 。因为电流 I_1 和 I_2 起初是未知的，所以要用試选法来决定这些电阻。

苏联最早的短路电流計算模型是Л.А.戈罗茨基設計的〔見文献B-3〕，并由全苏电工研究所制造。在当时，Л.А.戈罗茨基的模型获得很大的推广，它的照片示于图B-2中。

因为复杂系統短路电流的数学計算是很复杂的，而电力系统电阻模型在运行上很簡單，价格又不貴，所以直到現在还是解决这些問題的很有利的工具。



图B-2 戈罗茨基設計的短路电流計算模型

最初的电力系统电阻模型是通用的。

目前这种类型的模型，是为需要对各种不同动力系统进行计算的设计和有关单位制造的。

通用模型也用于动力系统中。但是，常用的是复制某一系统电气接线图的专用模型。在这种模型上，每一线路、发电机或变压器都用固定不变的电阻来复制，这样就使制造简单，造价降低。通过固定组合的系统接线图，能很快地得到计算结果，而不必在排布接线图上花费时间。

为了决定动力系统有功和无功功率的潮流分布，以及解决一些其他问题，应用直接复制系统元件的电阻和电抗的模型是较为合适的。

然而，自最初的电阻模型出现以后，经过了十三年才在电力系统的模拟技术中建立有电阻和电抗的交流模型。这是三十年代在美国麻省理工学院和通用电气公司〔见文献B-4〕及西屋公司〔见文献B-5〕共同完成的，而苏联是在全苏电工研究所由C.A.列别捷夫完成的〔见文献B-6〕。从那时起，制造了许多各式各样的通用和专用交流模型。

和电阻模型一样，交流模型也有很多名称：交流台或屏、交流计算台、网络分析器、交流模型。在本书中，将称它们为电力系统交流静态模型，或者简称为交流静态模型。

交流静态模型比电阻模型更完全地模拟电力系统，使用电阻、电抗和电容来复制输电线路、变压器、发电机、电抗器等阻抗。在通用模型上，可以用专门的操作盘和导线把这些阻抗和电容组成任何电力系统的电气接线图，然后将代表不同类型的相位和电位调节器的专门装置上的电压，加到接线图上接入同期电机的点，这些电压的大小和相位可以在很大的范围内改变。

改变电压的相位可使送入接线图的有功功率发生变化，而改变电压的大小则可调节送入的无功功率。这样，调节装置就复制了发电厂发电机的运行方式，一般称作发电机(厂)模型。

在静态模型上用电阻和电抗来复制动力系统的用户，调节这些阻抗的大小，使它们所消耗的有功和无功功率相当于负荷的给定功率。

交流模型的建立大大扩大了应用模型来解决动力系统设计和运行中所有基本问题的范围，并提供了应用它们来进行动力系统稳定计算、有功和无功功率潮流分布计算，以及确定电压等的可能性。

在装于全苏电工研究所的第一台模型运行以后，该所根据C.A.列别捷夫的设计〔见文献B-7〕为火电设计院和乌拉尔动力系统制造了工业型的模型(图B-3)。

在美国，继上述第一批模型的建立以后，在1938年出现了通用电气公司的模型〔见文献B-8〕。这种模型的照片示于图B-4中。

各国更现代化的交流模型将在下面几章中加以叙述，这里仅引用各种模型的照片，其目的是用来说明最初的结构及它们的发展变化。

在英国、法国和其他国家中，模型的建立远较苏联和美国为迟。

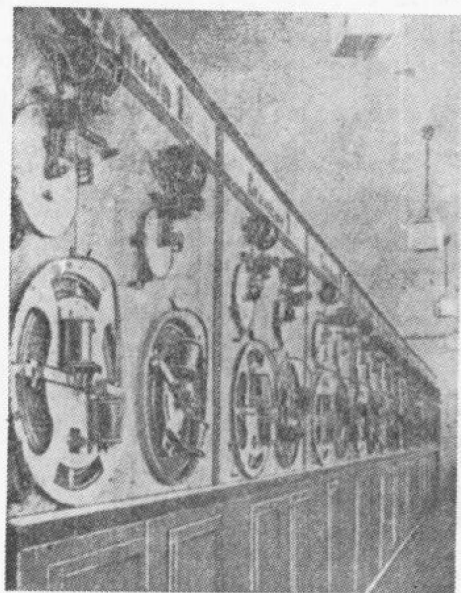
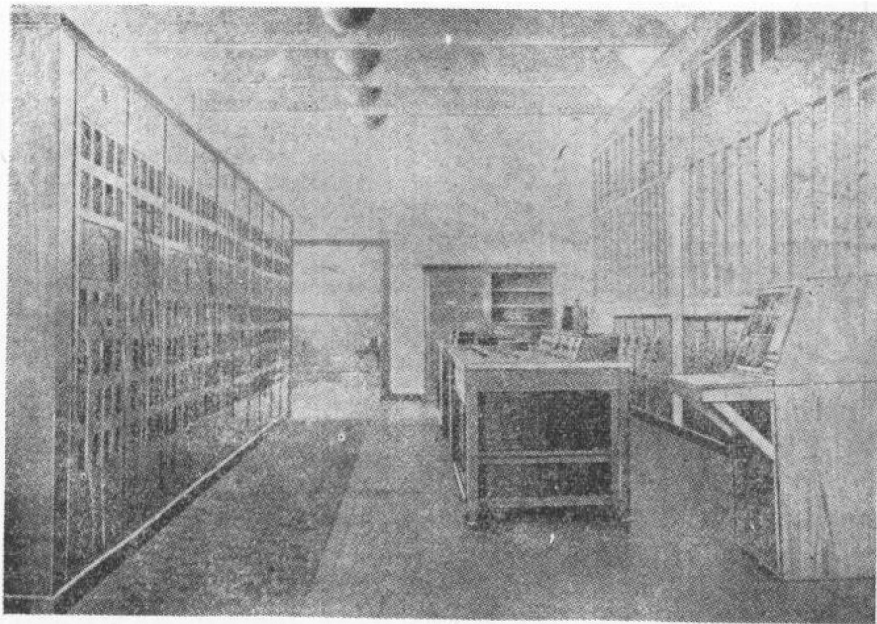


图 B-3 装在火电设计院的 ВЭМ 型
电力系统模型（1934年）

在图 B-5中表示出1939年西門子公司制造的第一台交流模型〔見文献 B-9〕，它的结构較美国和苏联的簡陋得多。这种模型的有趣特点是它从个别电抗綫圈、电容器和电阻中选用所需要的阻抗值的方法，这些阻抗事先不組合在底盘上，而仅在模型上复制被研究的結綫图时才組合。这种方法并不是最好的，但以后仍在某些别的国家的模型中被采用。

图 B-6 表示英国湯姆逊豪斯頓公司模型的照片。这种模型〔見文献 B-10〕在很多方面与美国通用电气公司的模型相似。

不久以前，电子技术还没有被广泛应用于电力系统静态模型的制造中。在大多数模型中，电子技术仅用来放大接入仪表的电流和电压。

后来，在美国伊阿华州专门学院所建造的模型中，曾应用电子技术的成就来获得較高的工作频率，在模型的结构中应用标准的无线电零件，并且以简单的調节和移相結綫图来代替繁复的感应式相位和电位調节器，以調节电压的相位和大小。但是，这种模型的工作原理和使用技术仍和以前的一样。

交流模型的复杂性限制了它的推广。到目前为止，全世界仅有一百台左右这种模型。

为了建造能为动力系统和設計科研单位广泛应用的装置，火电設計院曾在1940年开始設計新型结构的模型，并在1945年完成成为莫斯科动力学院制造的这种模型（图 B-7）。

这种模型的新的发电机（厂）模拟系统、綫路元件和操作盘的新型结构〔見文献 B-11〕大大簡化了模型的制造，并使模型的重量和尺寸比其他苏联模型和外国模型小好几

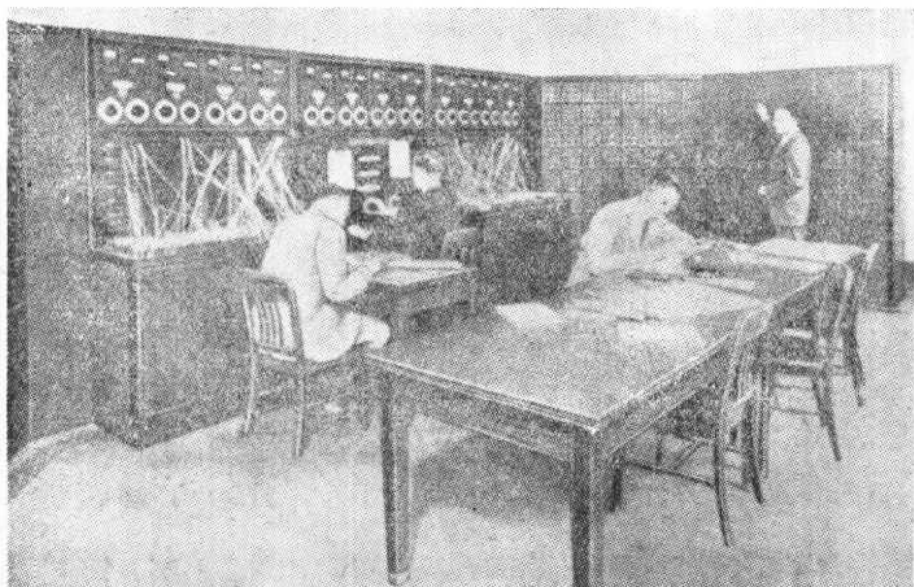


图 B-4 通用电气公司的电力系统模型

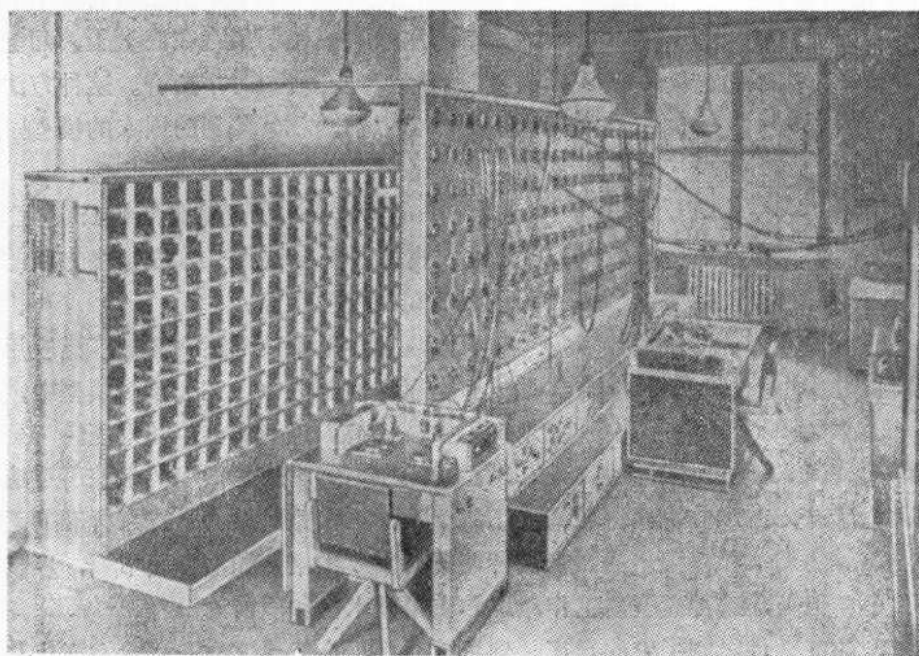


图 B-5 西門子公司的系統模型

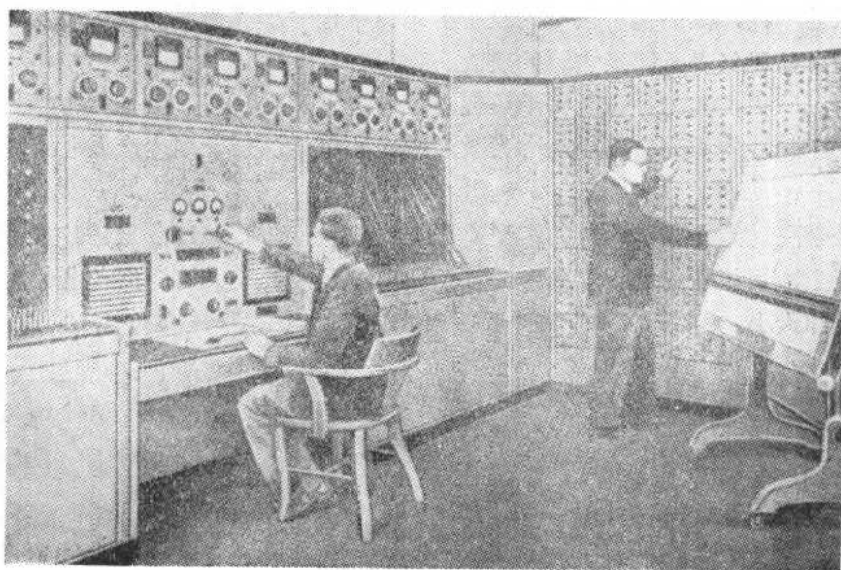


图 B-6 英国汤姆逊豪斯顿公司的电力系统模型

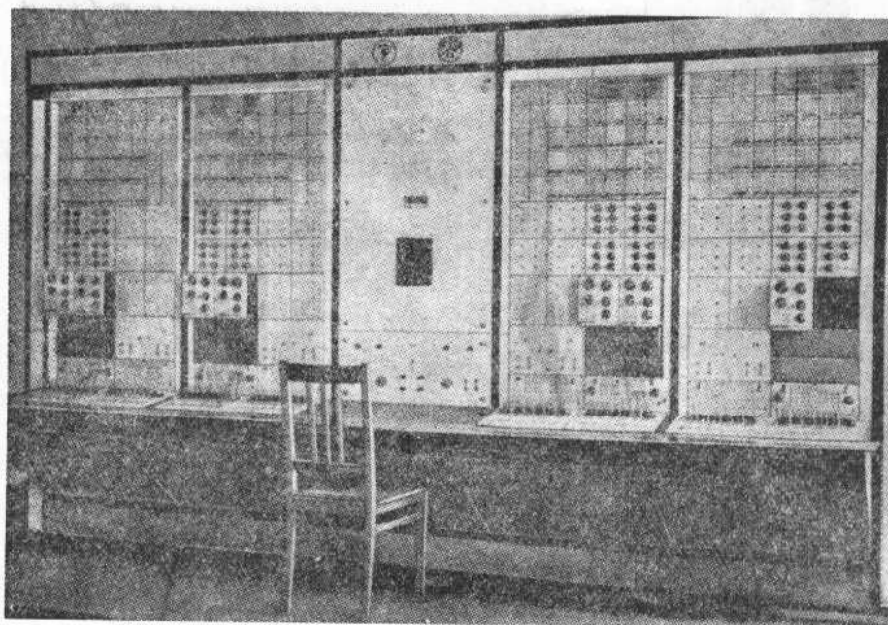


图 B-7 装在莫斯科动力学院的第一台火电设计院型电力系统模型

倍。

由于尺寸不大，因而能将模型的设备排列得可让一个操作员操纵几个发电厂和负荷的阻抗，并同时监视仪表及记录它们的读数。

目前为苏联很多动力系统及科学研究单位制造了这种模型，但在结构部分作了改进。

自1960年起，安排列宁格勒动力系统所属中心修造厂来计划生产火电设计院设计的模型。

苏联科学院动力研究所设计的模型（图B-8）〔见文献B-12〕是1947年开始运行的。在这个模型上，用标准的电话设备作为接触系统，而用感应式的相位和电位调节器来调节电压的相位和大小。

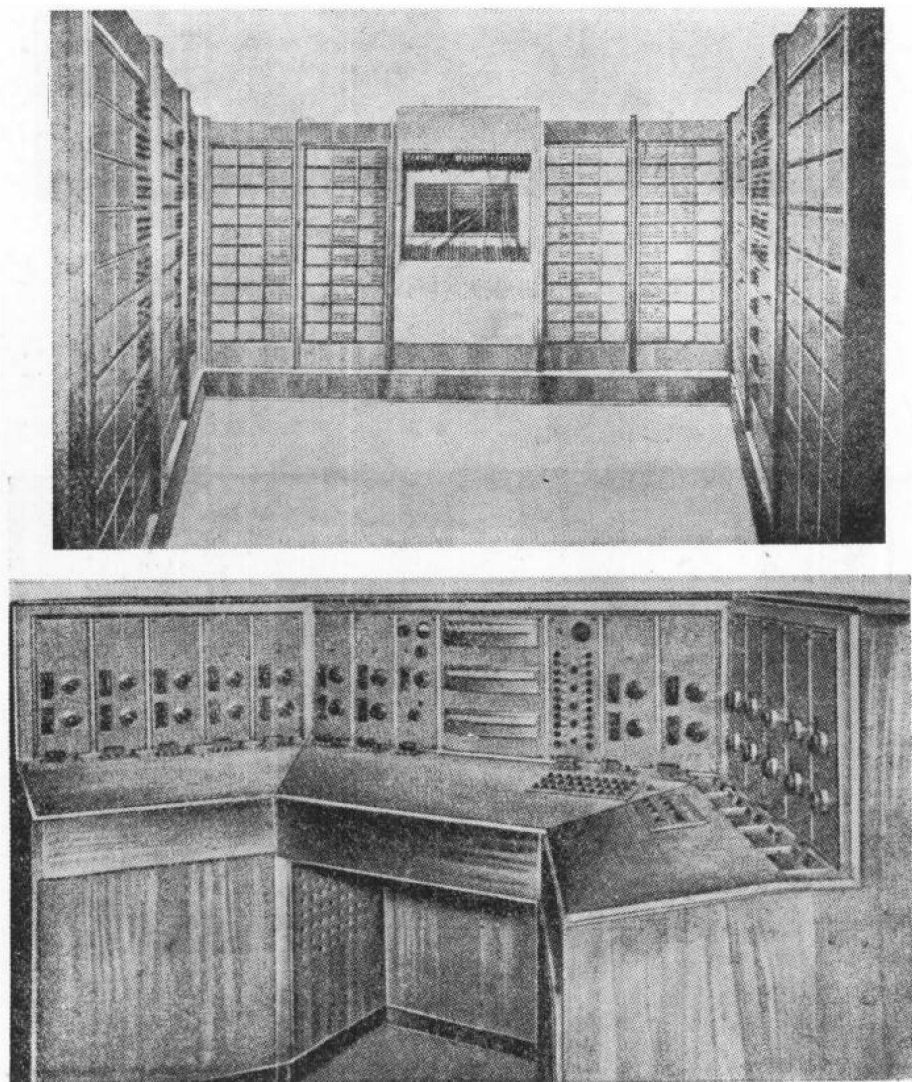


图 B-8 苏联科学院动力研究所的电力系统模型

上面所列举的电力系统交流静态模型都是通用的。

在苏联，1939~1940年火电设计院曾为莫斯科动力系统设计了专用模型（图B-9）。

模型上装有标出高压电网及发电厂和变电所的仿形結綫图的屏。在屏的背面装配着結綫图中各元件的阻抗，每一发电机、变压器、綫路或系統的其他元件均以相应的阻抗来复制。用插头可将这些阻抗换接在某一母綫系上，或者全部切除。

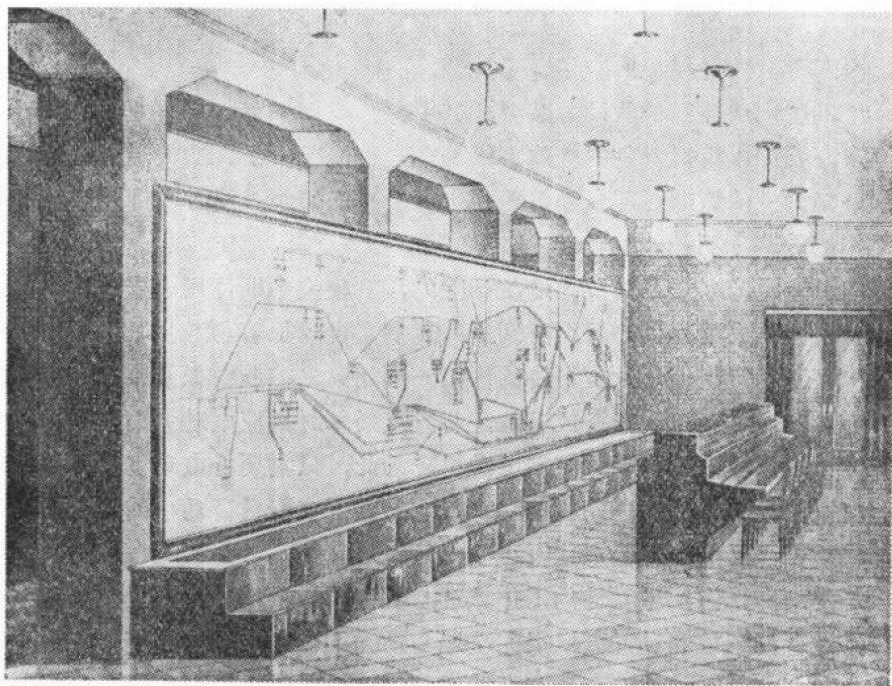


图 B-9 火电設計院为莫斯科动力系統設計的电力系统专用模型

仿形結綫图使人一目了然。动力系統元件的单个模拟就不需要阻抗具有很大的变化范围，阻抗只要做成固定的值就行，这样就降低了造价。为了研究結綫图的远景方案，預先要制备一些变化范围很大的阻抗。

发电机和負荷的单个模拟需要大量相应的模型元件。用手来操纵这些元件是很困难的，所以在模型上規定用发电机和負荷元件把有功和无功功率自动維持在某一給定水平。

这个設計在战后几年里沒有得到实现。經過很多年以后，对这个設計作了某些改进，現在用于苏联欧洲部分动力系統联合調度局的模型上。

最近几年中，在国外也出現使新生产的或現有模型自动化的趋向。在很多国外模型上，使負荷元件的有功和无功功率自动維持在某一給定水平；而在其中某些模型上，則使发电厂的有功和无功功率維持在某一給定水平。

除了改善以前的原理以外，动力系統数学模拟发展現阶段的特征是下列三个新的模拟方向的出現和发展：

- 1) 动态模型的建立。这种模型自动地复制动力系統中的稳态运行方式和机电暫态过程。它不是根据物理相似的原理，而是根据被复制的运行方式和过程的数学同一性。这样就可能不用旋轉电机，而以簡單的方法来模拟复杂系統。

- 2) 連續作用計算机的出現。

- 3) 自动数字計算机的推广。

假如更广泛地来討論电力系统模拟問題，那就不能不指出，电力系统靜态模型的基本

原理具有片面性和局限性。無論在最初的这种模型上，或者在現代的这种模型上，系統模拟都局限于系統結綫图与它的模型之間的相似，即仅限于靜态因素的相似。

但是，要建造这样一种具有被模拟对象全部特性，同时又象靜态模型那样简单易行的模拟装置，不是一个简单的問題。到目前为止，由于在建立較完整的模型方面进行了試驗性的工作，因而导致物理模拟的应用。

然而，可以找到很多简单的模拟装置，其中每一个用来复制对象的某一特性。将这些特性綜合起来，就可以模拟对象的整体。因为在这种情况下大大扩大了模拟装置的选择，所以綜合局部相似性的原則就可以简单地用来解决这个問題；同时，可能应用与系統被模拟元件的工作原理完全不相似的元件。

在实际的系統中，电压是由旋轉电机产生的，在模型中則可用电子管振蕩器来产生交流电压。改变模型电子管振蕩器振蕩回路的周期，可以很容易地变化交流电頻率。例如，应用第二控制栅极，則可改变振蕩的振幅。利用第二控制栅极回路中电容器的充电和放电，很容易自动地复制由于短路或其他运行方式破坏时感应电动势的衰减。

可以更简单地来模拟用户的非同期电动机。为此，只需要将电动机用等值結綫图来代表。等值結綫图中的阻抗决定电动机的負荷，它是随着实际負荷功率的变化而变化。这可用受專門的傳送器操纵的变阻器来达到。

这样，虽然新的动态模型元件的工作原理与被复制的系統元件的工作原理完全不同，但是在模型上发生的現象和过程可以很完全地与动力系統中的过程相应。

換一句話說，复杂系統的綜合和相互联系着的特性和过程，可用很多简单的模拟装置来复制。其中每一个装置可在原理上与复杂系統或其元件不相似，但和它們有一个或几个共同的特性。

这种原理的进一步发展，表明可以建造这样一种同期电机的模拟装置，它能使暫态过程在任何瞬間“冻结”（即停頓），然后經過任何時間，使过程自那一瞬間繼續进行。

在模型上使过程停頓（見第三章），可用来将过程以数字形式自动記錄在紙帶上。不用一般的測量仪表，而代以数字信号盘，也是重大的改进。数字信号盘的讀数随着自动数字記錄仪的每一个循环而更換。这种測量系統也可用于交流靜态模型。

目前，在国外文献中有好多种动态模型的介紹，但是这些出現得較迟的模型在作用原理上，与苏联的很相近。

略为不同的方向是使用連續作用計算机（或称作模拟机）的电力系統模拟。这种計算机的基本元件是直流放大器，它們可用作結綫图中的积分或微分环节，也可用来加算电气量值。在放大器的輸入回路和反饋回路中使用阻抗的不同配合，可在輸出回路中得到有时要用很复杂数学方程式来表示的电压变化。計算机有常系数和变系数的部件、非綫性部件和各种函数变换器。可用这些元件来組合結綫图，結綫图中的电气过程决定于和被研究系統中的过程一样的方程式。

苏联工业部門生产各种型号的連續作用計算机：MH-7，MHM型不大的台式計算机；ИПТ-5，МНВ型較大的計算机；MH-8，MH-14大型計算机。

在研究动力系統时，連續作用計算机或它們的元件可以作为独立的装置，也可作为电力系統交流模型的輔助装置。在第一种情况，較适合于模拟发电厂数目不多的简单系統，

也可用来解决例如分析自动调节励磁系统、分析自动调节频率和有功功率系统、研究再同期等问题。在第二种情况，可用来模拟同期发电机与它们的励磁系统和调速系统。

在连续作用计算机上，模拟具有很多同期发电机和负荷或复杂电网的复杂动力系统的可能性，实际上受到方程式复杂性的急剧增长和需要很多解算用的放大器的限制。所以，到目前为止，动力系统的研究仅限于复制2~3个同期发电机，仅在某些简化地考虑电机的特性情况下，才可达到4~5个电机。

很显然，在模拟复杂系统时，第二种方法，即连续作用计算机和电力系统交流模型配合起来是比较正确的。但是，模型是用交流电源工作的，而连续作用计算机采用直流电源。这种情况使模拟复杂化，并在某种配合方式下需要将直流信号变换为交流信号，或者进行相反的变换。无论在苏联[见文献4-4]，或者在其他国家[见文献4-13]，连续作用计算机与交流模型之间具有各种配合方法。

最近，在所有技术领域里日益广泛地开始应用自动数字计算机。这种计算机也用于电力系统的计算。数字计算机的高度准确性，使它首先用来进行动力系统负荷经济分配等的计算。但是，它们也用来计算复杂系统中的有功和无功功率潮流分布、系统的稳定性，甚至短路电流[见文献5-2]。

也曾尝试用数字技术在某种程度上来模拟稳态和暂态过程中同期电机的工作状态。

作为调度员的参谋，数字计算机在计算最佳运行方式和预测负荷曲线上可能有很重大的意义。

今后，有可能将数字计算机或它们的元件，与交流模型或连续作用计算机配合使用。由于这个原因，应该指出，在交流和直流模型以及连续作用计算机的乘法部件等装置上，有可能用数字技术来测量和记录电压、电流和功率。

希望将数字计算机和交流模型配合起来是有原因的，因为仅在具有很大存储器 and 很快计算速度的大型数字计算机上，在技术上才有可能进行复杂电力系统的计算。这种计算机的价格很贵，而且需要训练有素的维护管理。目前，苏联工业部门生产的计算机中，有“Урал-2”、“Урал-4”和“БЭСМ-2”可用于复杂电力系统的计算。

这些计算机的算术运算速度分别是每秒5000、10000和7000次。“Урал-1”型计算机只有很低的速度——每秒100次，这种计算机可用来计算不复杂的系统。

快速数字计算机除了具有很快的计算速度和准确性外，它的重要优点是能完成某些逻辑运算。例如，可从几个电气接线图方案或动力系统的运行方式中选出最佳的方案，这个最佳方案是满足事先给定的特定要求的。

最后，快速数字计算机不仅可用于电力系统的计算，而且可用来进行任何计算。这就构成了充分和有利地利用这种计算机的条件。

在列举目前用来研究电力系统及制订其运行方式和设备的基本方法时，假如不提到电力系统的物理模拟，那是不完全的。关于物理模拟，在文献B-13和B-14中已有详细的叙述，所以在本书中就不再讨论了。

远距离输电和电力系统的物理模拟，可用来研究机电暂态过程、继电保护、同期电机的励磁调节和某些提高稳定和输电线路输电能力的措施。

在物理模型上，可以在近似于运行条件下进行某些设备的实物试验，如励磁调节器的

試驗。曾在物理模型上廣泛地研究了某些輸電綫的穩定工作條件。例如，以 B.И. 列寧命名的伏爾加水电站到莫斯科的輸電綫，以及其他 500 千伏的輸電綫。

物理模型有時稱作動態模型，在本書中將這種模型稱作物理模型。

從上面的論述可見，目前有很多設備可用來研究電力系統的工作情況：

- 1) 電阻模型；
- 2) 交流靜態模型；
- 3) 電力系統動態模型；
- 4) 連續作用計算機；
- 5) 自動數字計算機；
- 6) 電力系統物理模型。

上述的每一種設備都有它自己可能和最有效的應用範圍。根據所要解決的問題的多样性及其意義，這種應用範圍是不同的。它們不僅決定於這些設備在技術上的可能性，也決定於研究者是否擁有這種設備。在今後，某些設備的應用範圍將逐漸縮小，而另一些設備的應用範圍將逐漸擴大，這是和每一種設備的發展和改進有關的。

可以指出下列幾點，作為改進上述簡化動力系統研究的技術設備，並擴大其應用範圍的主要方向。

在電阻模型上，應裝備自動記錄測量的數字儀表，這將提高計算結果的準確性及計算的速度。模型應有很好的穩定電壓。應改進接觸系統，改善組成的結綫圖的顯明性，使計算運行方式的过程自動化，其中包括由於恒定電流元件的應用。

當完成了這些條件，可以預期，在短路電流計算及近似地決定有功和無功功率的潮流分布時，電阻模型仍將保持其作用價值。假如這種模型仍然是目前所具有的樣子，那末它的應用範圍將逐漸縮小。

應該生產電力系統動態（自動）模型來代替交流靜態模型，而現有的靜態模型應改裝成為動態的。這種模型的應用將在研究複雜系統的穩態運行方式和暫態過程的領域中推廣。和目前一樣，設計和研究單位將用通用模型，而動力系統則全部或局部地應用專用模型。

今後，應用連續作用計算機來研究簡單電力系統的暫態過程和分析自動調節系統將是合適的。然而，這種計算機的準確度和工作穩定性應該提高。為了研究電力系統，應該建立專門的計算機，它能和電力系統的自動模型分開或者一起工作。

快速數字計算機的應用範圍將不斷擴大。這裡決定性的因素不僅是數字計算機的廣泛可能性，而且是它的產品的急劇增長。

數字計算機首先應用來解決經濟和計劃性質的問題，以及結果需要有很高準確性的運行方式計算及其他的計算。進行這類計算時，必須應用具有很大大存貯器和很快計算速度的計算機。大的設計和研究單位以及聯合動力系統調度局應裝備這種計算機。裝有這種計算機的單位，一定會合理地用它來解決很多問題，其中包括短路電流的計算。

物理模型仍將在它目前的應用領域里保持其作用。大的電力研究所和專題實驗室應裝備有物理模型。

第一章 使用最简单模型的电力系统模拟

1-1 通用的电力系统电阻模型及其改进的方法

根据电力系统的简化接线图来计算短路电流的可能性，导致了电力系统最简单模型的创制，它用电阻来模拟系统的电气接线图，并用直流电源来模拟发电厂中发电机的电动势。

正如大家所知道的，例如三相短路时的短路电流可依下式来加以确定：

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\sqrt{3}Z},$$

式中 $\dot{E}$ ——发电机的电动势；

Z ——从发电机电动势 $\dot{E}$ 的施加点至短路点间系统接线图的阻抗。

假如在正常情况下，发电机经过变压器和线路送电，而短路发生在线路末端上，那末，在此情况下，阻抗 Z 的大小将由线路阻抗 Z_L ，变压器阻抗 Z_T 和发电机阻抗 Z_g 所组成，即

$$Z = Z_L + Z_T + Z_g.$$

在决定短路第一瞬间不计周期分量的电流值时，以发电机次暂态电动势 E'' 和次暂态电抗 x'' 代入公式。

发电机的电阻可以忽略，因为它通常只为电抗的30~50分之一。变压器的电阻也可以不考虑，因为这个电阻只为变压器绕组的电抗的10~20分之一或更小一些。

导线截面积大于70平方毫米的架空线路的电阻值也比线路的电抗小，然而电阻和电抗的差别是不大的，只有用ACY-300和更粗导线的线路电阻才比电抗的1/4小。

但是在计算短路电流时，甚至用AC-70和更细导线的线路电阻通常也忽略不计，而不致于对准确度有较大的损害，因为这个电阻仍要比变压器和发电机的电抗小好多。

显然，假如在计算的接线图中，将所有的系统元件的电抗用数值相等的电阻来代替，那末，这 will 不影响计算的短路电流值。

在分析计算时，这样的代替是没有什么意义的，但是在模拟装置中复制电力系统元件的电抗时，阻抗的替代可使模型显著地简化，因为电阻的制备要比电抗简单和便宜得多。

对于简单接线图的短路电流计算不必使用模拟方法，但在计算具有多个发电厂的复杂系统时，模拟的合理性则变得很明显。

分析复杂接线图中的电压和发电机电动势的向量图表明：各个发电厂的发电机电动势向量间的夹角通常不超过 $20 \sim 30^\circ$ 。在这种情况下，按电动势间无相角差的假定所计算得到的短路电流，与同一接线图在计及电动势向量的相角差时所决定的电流，在数值上差别很小。

这种情况使创制以直流工作、专用于短路电流计算的电力系统简单模型成为可能。