

高等學校教學用書

電力系統短路

蘇聯 斯·阿·烏里揚諾夫著

燃料工業出版社

高等學校教學用書

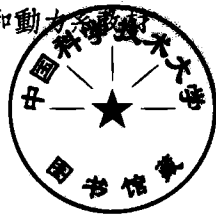
65

電力系統短路

蘇聯 斯·阿·烏里揚諾夫著

張 鍾 俊譯

蘇聯高等教育部審定作為動力學院和動力系教材



燃料工業出版社

出版者的話

本書由上海交通大學電力工程系輸配電教研室主任張鍾俊教授翻譯，譯稿曾請哈爾濱工業大學賀家李、吳展允、鄧振煌、范崇澍同志校訂全文，且於書末附加「習題」部分。發稿前我社又請中央燃料工業部生產技術司徐威、吳競昌、倪鍾煥、黃繼隆、周輔昌諸同志將第一至第六章再加校訂。

譯者爲了幫助讀者易於理解本書內容起見，對個別公式的推演及例題的演算作了一些補充。此外，在附錄內附加了四個標準型汽輪及水輪發電機的運算曲線表以及符號名稱對照表等。

本書用數字實例說明了高壓電氣設備的短路現象及短路過程的計算方法。

本書可作爲動力學院和大學電力工程系的教材，以及電氣工程師在實際工作中的參考書籍。

電力系統短路

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)

1952年莫斯科俄文第四版翻譯

蘇聯 С. А. УЛЬЯНОВ 著

張 鍾 俊 譯

燃料工業出版社出版

社址：北京東長安街燃料工業部

北京市書刊出版業營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印

新華書店發行

編譯：顧維源

校對：嚴美蘭 陳 楓

書號178 電 79

787×1092 1/32 開本 * 112頁 印張 * 270千字 * 印S, 201—10, 250册

一九五四年五月北京第一版第一次印刷

一九五五年四月北京第一版第二次印刷

定價一元八角

出版者的話

本書由上海交通大學電力工程系輸配電教研室主任張鍾俊教授翻譯，譯稿曾請哈爾濱工業大學賀家李、吳展允、鄧恢煌、范崇澍同志校訂全文，且於書末附加「習題」部分。發稿前我社又請中央燃料工業部生產技術司徐威、吳競昌、倪鍾煥、黃繼隆、周輔昌諸同志將第一至第六章再加校訂。

譯者爲了幫助讀者易於理解本書內容起見，對個別公式的推演及例題的演算作了一些補充。此外，在附錄內附加了四個標準型汽輪及水輪發電機的運算曲線表以及符號名稱對照表等。

本書用數字實例說明了高壓電氣設備的短路現象及短路過程的計算方法。

本書可作爲動力學院和大學電力工程系的教材，以及電氣工程師在實際工作中的參考書籍。

原 序

本書是高等動力學校和高等電工學校內「發電廠、配電網及聯合輸電系統」專業學生用的「短路電流和地中電流」一門課程的課本。它包含與上述課程內「短路電流」部分有關的材料。

本版的內容是經過補充修改的。爲了減少書的篇幅，在個別的地方有些減縮。1949年出版的本書第三版所得到的批評和意見，也在編輯時予以重視。

本書中短路過程一般是在發電機具有自動電壓調整器的條件下來研究的。同時，除了短路現象的物理方面的解釋以外，還用基本的數學計算來進行分析。

對於決定同步機在突然短路時的行爲的一些參數，有足夠詳盡的討論。屬於「電機學」這一門課程的某些問題之所以不得不重複一下，是因為這些問題相當難，而要通曉短路問題的基本原理，又必須對這些問題有明確的知識。

本書中所敘述的短路電流計算的實用方法，僅限於在蘇聯被廣泛採用的。除了較複雜的方法以外，也介紹了最簡單的計算方法，這些方法常可用來充分解決許多技術上的問題。

在敘述不對稱短路時，對下列各點都已予以注意：架空線和電纜的零序參數的論證，零序等效網絡的制訂，各種不同短路的總結，各種短路情形下電流大小的比較，在短路過程中的任意瞬間求出電流和電壓所採取的實用方法。

本課程所有最重要的原理，都以數字表明的例題來說明，其中每一個例題（很少例外）都是完整的，並不和前面的例題有連帶關係。這樣當然是有利於閱讀的。由於正在準備出版一冊本課程的習題和例題集，第三版中的習題便不放在本書中了。

關於短路的一系列的專門問題：如同一系統中不同地點的同時短路、破壞電路對稱情況的短路（如斷路、自動重合閘等）、短路時考慮

到電機的搖擺等，都是超出本課程現有教學大綱的範圍的。要熟悉並研究這些問題，讀者須參閱已發表的專門論文，其中重要的見本書末尾的附錄。

著者希望，本書的主要目的除了用作高等學校的課本以外，還能作為電氣工程師在實際工作中的良好參考材料。

著者樂於採納對本書的一切批評和建議，並請惠寄至莫斯科國立動力出版社。

斯·阿·烏里揚諾夫

目 錄

出版者的話

原序

緒論

第一章 短路的一般概念

第 1 節	基本定義	8
第 2 節	短路過程的一般特性	8
第 3 節	短路的種類	11
第 4 節	產生短路的原因	13
第 5 節	短路的後果	14
第 6 節	短路過程計算的目的和對它的要求	15
第 7 節	關於短路過程計算方法的一般意見	16

第二章 進行短路計算的步驟

第 8 節	基本假設	19
第 9 節	進行計算的程序	20
第 10 節	標么制	22
第 11 節	等效網絡的制訂	25
第 12 節	等效網絡的簡化	32
第 13 節	重疊定理的應用	38
第 14 節	電流和電壓的分佈	42
第 15 節	短路功率	42

第三章 三相短路的穩定狀態

第 16 節	概說	44
第 17 節	基本參數和關係式	45
第 18 節	圖解法	49
第 19 節	負載的影響	56
第 20 節	穩態短路電流的近似計算。用直線代替無載特性曲線的方法	60
第 21 節	複雜網絡中三相短路穩態的計算	67

第四章 三相短路的暫態過程

第 22 節	最簡單電路的三相突然短路	73
第 23 節	短路電流的有效值	78

第 24 節	接有變壓器電路的突然三相短路	80
第 25 節	電機三相短路暫態概說	81
第 26 節	三相系統的通用矢量	85
第 27 節	同步電機的暫態電勢和暫態電抗	88
第 28 節	無阻尼線捲同步電機的突然三相短路	93
第 29 節	三相短路過程的暫態分析	102
第 30 節	同步電機的大暫態電勢和電抗	112
第 31 節	具有阻尼線捲同步電機的突然三相短路	116
第 32 節	電動機的突然三相短路	122
第五章 三相短路暫態的實用計算法		
第 33 節	概說	126
第 34 節	短路電流非周期分量的計算	127
第 35 節	短路電流周期分量的最簡單計算	131
第 36 節	起始大暫態電流和短路衝擊電流的計算	135
第 37 節	選擇高速開關的簡捷計算法	139
第 38 節	運算曲線法	141
第 39 節	直線化特性計算法	166
第六章 不對稱短路		
第 40 節	概說	180
第 41 節	對稱分量法的基本意義	180
第 42 節	高次諧波的形成	184
第 43 節	逆序感抗和零序感抗	186
第 44 節	序網絡圖	208
第 45 節	不對稱短路處的電流和電壓	211
第 46 節	各種不同短路時電流的極限比值	223
第 47 節	電流和電壓的分佈	230
第 48 節	複合序網	236
第 49 節	電流和電壓對稱分量的變換	238
第 50 節	在不對稱短路情況下不同時間的電流和電壓的計算	242
附錄		257
習題		270
答案		285
俄文參考文獻		287

緒 論

電力系統和它各個元件工作的可靠性，與在其暫態過程中所發生的危險現象之被正確而充分估計的程度大有關係。短路便是這些過程之一。

當穩定狀態的理論早就走上正確的道路並迅速地適合實際需要的時候，暫態過程的本質還一直得不到解釋。研究這種本質當然不是爲了研究而研究。認識這本質，首先是爲了防止危險的暫態過程的發生。洞察這些過程的本質愈深入，則自覺地控制它們的可能性也愈大。

以電機製造的發展爲例，不難看出對短路現象的注意是如何重要了。

電機最初的構造，只符合正常持久工作的要求。當電機的功率較小、且材料消耗是否經濟的問題還未被充分注意的時候，這樣製造出來的電機對短路電流的機械效應和熱效應的穩定性，已具有足够的「自然」儲備。但是，這種情況存在得並不長久。隨着電機功率的增大和力求最合理地使用材料，說明了僅僅滿足正常工作的要求，是不能製造出具有最可靠結構的電機的。電機在短路時所發生的不止一次的巨大損害的情形，可作明顯的證據。製造廠家已注意特殊辦法的研究，以保證電機在故障情形下亦不失去應有的性能。這些辦法的成功，與我們對短路過程本身所了解的確切程度有直接的關係。深入研究的結果對新的構造上的解決開闢了途徑，從而逐漸產生了愈來愈可靠的電機構造。現代化的電機（有各種功率和使用於各種電壓之下的）是電力系統內最可靠的元件之一。當然，這種可靠性不僅顧到短路現象，而且也顧到電機所遭受的一切其他的現象和情況。

類似的例子也可從電器製造方面找到。在現代每個電器的構造中都具有依據短路時工作條件所決定的特點。

因此，隨着技術的發展，對暫態過程（包括短路過程）的研究，逐

漸具有日益重要的意義。電力用戶方面對保證可靠供電的要求的不斷提高，也促進了它的發展。

隨着更高電壓的應用，電力網和高壓輸電線的發展，發電廠的併列運行的實現，形成電力系統所必須解決的問題，其範圍就不斷地增大。由於人民生活的發展，給電業工作者提供了許多新的問題。好多在從前已得到解決的問題，在新的情況下，開始具有另外的意義，並要求在本質上重新研究。一組性質相近的問題又可以區分為幾種特殊的問題來進行研究。例如：過電壓保護問題，短路問題，電力系統穩定問題等。

所有這些問題相互之間多少有些聯系，因此它們的區分僅是相對的。但是，由於每一問題所牽涉到的問題的性質不同，為了便於從不同的前提和假設出發，將它分析並得到實際的解決，這樣的區分還是適宜的。例如：短路問題和電力系統的動態穩定問題的關係是很密切的，它們都牽涉到電力系統中的同一過程，但是這過程在兩種問題中，是從不同的角度來討論的。為了估計短路的影響，需要知道電流和電壓的大小，而為了判斷系統的動態穩定度，則需要知道有效功率的可能波動。因此，如果說在前一情形中應該將主要的注意力集中於電磁現象，那麼，在後一情形中主要的注意力就應該集中於同一過程的機電現象上，這樣就使我們從不同的途徑獲得實際的解答，因為這些現象事實上是互相關聯的。所以，要獲得準確的解答，必須再將它們組合起來研究。換句話說，為了力求獲得更準確的解答，應使上述兩種問題的研究方法，趨於一致。

由此可知，從某問題中研究出來的辦法，多少會影響其他的問題；有時幾個問題的要求是互相抵觸的。例如：為了減小短路電流的數值，希望降低發電機的勵磁電流（從前是這樣做的）；但是根據動態穩定的條件來說是不容許的。相反地，為了動態穩定應有的儲備，常常要求發電機的勵磁電流在故障情形下迅速增大。

電力系統的可靠工作只有在同時兼顧由不同問題所決定的一切因素的情形下，才能得到保證。分別獨立地研究這些問題，最後把它們總結起來，便可找出最合理的綜合解答。

在偉大的十月社會主義革命以前，短路問題的研究還處在最原始的階段。舊有的計算短路電流的方法，由於缺乏必需的理論基礎，已經不能滿足實際的要求。上面提到的理論與實際脫節的現象，在當時是存在的。

在蘇聯，由於英明的列寧-斯大林電氣化計劃（蘇俄電氣化委員會計劃）的實行，以及它與偉大的斯大林五年計劃相配合的繼續發展，在蘇聯專家面前提出了新的問題，且必須迅速地使它們得到基本的解答。同時，對社會主義國民經濟整體一部分的電力系統所提出的更可靠工作的要求，必須加以考慮。短路問題的研究便是這些首要任務之一。在這方面蘇聯專家在短時期內獲得了巨大的成就，並大大地超過了外國科學界的成就。

社會主義制度容許廣泛地展開對短路問題的研究。除了科學研究機構（全蘇電氣工業研究所等）以外，並有規模巨大的聯合動力系統（莫斯科動力系統，列寧格勒動力系統）和設計機構（國立火力發電廠設計院）參加短路問題的研究，並建立了專門的組織。爲了進行綜合研究成果的工作，並爲了準備刊行短路問題導則的材料起見，在1930年組成了以克魯格（К. А. Круг）爲主席，並有謝德林（Н. Н. Щедрин）、馬爾戈林（Н. Ф. Марголин）、赫魯曉夫（В. М. Хрущев）、戈羅茨基（Д. А. Городский）、烏里揚諾夫（С. А. Ульянов）、契爾寧（А. Б. Чернин）、羅遜貝爾格（Б. И. Розенберг）、馬爾科維奇（И. М. Маркович）等人參加的專門委員會，並分組在莫斯科、列寧格勒和哈爾科夫等地進行工作。

詳細探討同步機在突然短路時的過程並研究出適當的理論，是極爲重要的。在這方面，戈里夫（А. А. Горев）、謝德林、列別傑夫（С. А. Лебедев）、日丹諾夫（П. С. Жданов）、馬爾戈林、戈羅茨基、伊凡諾夫（В. И. Иванов）等首先進行了巨大的創造工作。另一方面，對舊有的計算方法加以分析批判，研究出適合於現代實際問題的更完善的新方法，亦具有同樣重要的意義。在這方面進行過巨大的創造工作的則有謝德林、馬爾戈林、烏里揚諾夫、契爾寧、羅遜貝爾格等人。由於複雜的電力系統計算工作的繁重，促使蘇聯專家們研究並創造出

專門的計算台和計算模型。這些新創造在使用中完全證實了它們的正確性，並獲得了更廣大的用途。

特別需要指出，蘇聯學者和專家們的創造性的研究，大大地豐富了對稱分量的理論和它對研究不對稱短路時的供用。他們首先得出了關於一系列的複雜問題的重要理論和解決方法，例如：對稱分量濾過器的理論、複雜故障的分析和計算、對發生的高次諧波考慮等。同樣地，他們首先詳盡地研究了短路時如何考慮自動電壓調整器作用的問題，在現代，這是具有重大的實用意義的。

將近 1929 年底，根據短路分析和計算所彙集的材料，就可能為專門研究發電廠、配電網和聯合輸電系統的大學生設立一門獨立課程。它的內容已經超出了發電廠電氣部分課程的範圍（過去包括在這門課程內），並且短路的研究方法的特點和它的日益重大的意義，也決定了這種劃分的合理性。在過去，這門課程的範圍和內容，曾不止一次地按照新的研究成果修改和審訂過。這門課程的目的，是給學生以解決與短路問題有關的許多實際問題所必需的理論基礎，例如：電器的選擇、電力系統合理的接線圖和它們的各個環節的選擇、繼電保護裝置的設計和調節等，這些問題是在有關的專門課程裏來討論的。為了順利地掌握有關短路問題的材料，必需熟諳〔電工原理〕和〔電機學〕這兩門基本課程主要範圍內的知識。

在我們廣大的工程技術界人士中間，短路問題的迫切性引起了很大的興趣。科學技術團體曾舉行了專題報告和討論會。為了提高工程技術人員的質量而設立的各種技術學校，都舉辦了專題講座和實習。這一切都大大地有助於這方面知識的普及，並提高了蘇聯電力系統及其各種設備的設計和運行的技術。

關於研究電力系統短路的論文，在蘇聯最早發表於 1928 年（戈爾布諾夫、謝德林等人的論文）。在 1930 出版的〔電工手冊〕第二卷內，有由謝德林詳細編寫的有關短路的專門文獻。在各學校有了油印講義之後，開始分別出版了專論、教科書和參考書（戈羅茨基在 1931 年，馬爾戈林在 1933、1941、1947 年，謝德林在 1935 年，烏里揚諾夫在 1937、1941、1949 年，馬爾科維奇在 1947 年，戈里夫在 1950 年，契

爾寧在1952年等)，[“]在1944年並刊出了由蘇聯發電廠人民委員會技術部審定的（現在生效）「短路電流計算和在高壓設備中根據短路狀況選擇儀器和導體的導則」。1928年以來的許多有關短路問題的科學論文，都系統地登載在蘇聯主要的電工期刊內。

共產主義的偉大建設工程的實現，提出了一系列的新的複雜問題。大功率發電機的集中，採用更高的電壓以輸送電能至極遠的距離，以及長距離輸電線路採用縱補償（即電容串聯）的可能性，在短路方面重新提出了許多問題。斯大林時代的蘇聯學者和專家們，現在正勝利地致力於這些問題的研究和解決。

第一章 短路的一般概念

第1節 基本定義

電力系統的正常運行的破壞多半是由短路故障所引起的。

所謂短路故障是指正常運行情況以外的一切相與相間的連接，而
在中性點接地系統（或四線制）中並指一相或多相接地（或接中性線）。

在中性點不接地或中性點經補償裝置接地的系統中，一相接地叫做「輕短路」。這種短路在本書內不作討論。

電力系統在發生短路故障時，系統的總阻抗減小（減小的程度視故障點發生在系統中的位置而定），因而各支路內的電流較正常運行情況時的電流值增大。短路也使系統中各點的電壓降減，尤其是在故障點的附近。

在發生短路的地點，通常產生了某種阻抗，這阻抗是由電弧的電阻和短路電流從一相至另一相或從一相至大地所經過的元件的阻抗所組成。這種阻抗的準確計算在實際上是是不可能的，首先因為電弧電阻隨電流及電弧長度而變化，它的變化範圍很大，難以作準確的估計。另外，這種阻抗的數值在某些情況下可能很小，實際上可以略而不計。這種短路叫做「金屬性短路」。

在其他條件相同時，金屬性短路的電流值較有中間阻抗存在時為大。因此，如欲求出最大可能的短路電流值，應從最壞的情況出發，即假定在故障點沒有任何阻抗。本書以後所要討論的只限於金屬性短路。

第2節 短路過程的一般特性

假設一個電路內有一發電機，同時電路內各部分的阻抗固定不變，則當電路中任一處突然發生短路時，短路電流通過各支路時電流變化的特性曲線，和發電機內的相同。

圖 1, a 示在沒有安裝自動電壓調整器的發電機中發生短路電流

的典型波形圖。短路過程開始時，電流曲線一般與時間軸不相對稱。短路電流從該支路內起始電流瞬時值 i_0 開始迅速地達到最大值 i_y ，然後逐漸過渡到穩定狀況下的正弦電流 I_∞ 。在靜子和轉子的線捲內在

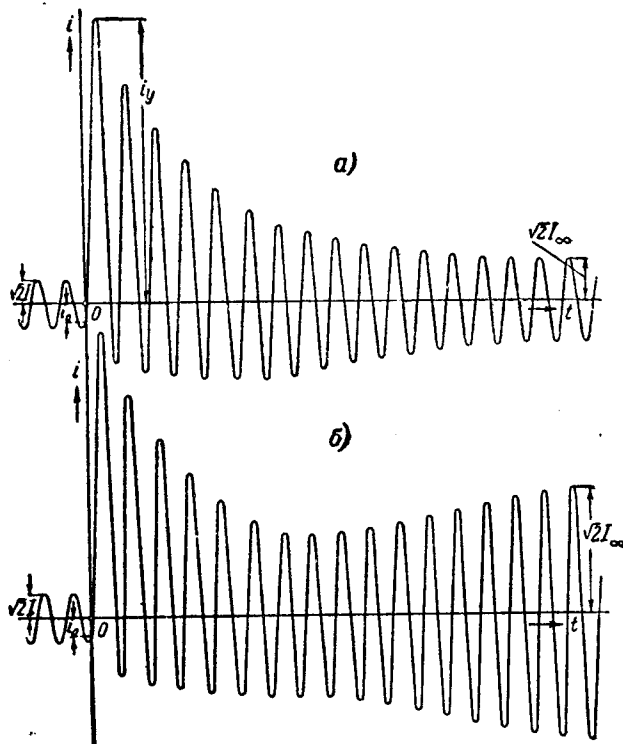


圖 1 突然短路時電流的波形圖

a—沒有自動電壓調整器；б—具有自動電壓調整器。

短路瞬間產生自由電流，由於這些電路具有電阻，因此，短路電流即逐漸衰減。由於靜子和轉子線捲間的磁耦關係，一個線捲內電流的變動引起另一線捲內電流的相應變動。短路電流衰減的速度決定於發電機和短路電路內其餘元件的參數。穩定狀態實際上在短路發生後 3—5 秒才開始。

發電機具有自動電壓調整器時，短路電流變化的特性可能不同。自動電壓調整器的用途是：通過反應被調整電壓的偏差的特殊裝置，

自動地調節發電機的勵磁電流使發電機端電壓維持在預定的水平。因為短路時電壓降低，自動電壓調整器即增加發電機的勵磁電流。事實上，自動電壓調整器要在發生短路 0.2—0.3 秒之後才起作用，因為發電機的磁系統和調整器都具有慣性。勵磁電流增大的速度和它所能達到的極限值決定於勵磁機的參數、自動電壓調整器的形式和短路地點的遠近。

因此，在發電機具有自動電壓調整器的情況下，短路電流變化的特性，同時由自由電流的衰減和勵磁電流的增大所決定。當短路地點很近時，電流變化的特性與沒有自動電壓調整器時的情形相同；但是這時的電流值（實際是在 0.2—0.3 秒之後）較沒有自動電壓調整器時要大些，而且短路過程的延時愈長，二者的差別就愈顯著。當短路地點很遠時，短路電流在達到某一最小值後，重新增大，趨向於它的穩定值，如圖 1,6 所示。

為了預先對短路電流可能的最大值有一概念，可用下述的數據來說明。當發電機出線端處短路時，電流的最大瞬時值可抵達額定電流波幅的 15 倍，而短路穩態電流則視發電機形式及短路的種類，處於額定電流的 1.5—5 倍之間。當發電機具有自動電壓調整器時，穩態電流的值，可能較上述的還要大一倍。

電力系統內各點的電壓，隨短路電流的變化而變化。電壓在短路的開始瞬間急劇下降後，其後的變化即由短路電流變化的規律所決定。發電機未裝置自動電壓調整器時，系統內各點的電壓立刻降低，而在短路穩態時達到最低值。當發電機具有自動電壓調整器時，電壓降低至某一最低值後，會再重新升高。如果短路地點很遠，則由於自動電壓調整器的作用，發電機端電壓可能恢復到正常值。

當突然發生短路時，通常發電機的電磁轉矩和它原動機軸上的力矩間的平衡即被破壞。因此，轉子的轉速將相應地變動，這是由於系統內負載和功率損失的急劇變動、而原動機的調速器由於慣性不能作相應的迅速的變動所引起的。

負載的性質對短路過程有重大的影響。只有一小部分的負載可以當作固定的阻抗；其餘部分由電動機（主要是感應電動機）所組成，它們

的阻抗是隨轉差率而變的，而轉差率則是施於電動機的電壓、傳動機構的阻力矩和其他因素的函數。有些電動機，在由於短路時電壓的減低而停止運轉時，仍舊連接在電力網中；而另外一些則在電壓降低至一定值時，由於特殊保護裝置的作用而斷路。在短路過程的最初階段，電動機可能因其儲藏的電磁能量的放出而產生反向電流。

當具有幾個發電機時，短路過程有幾個特點。第一個特點是線路中每一支線內電流的變化都會影響所有的發電機。第二個特點是可能引起發電機的搖擺，甚至失去同步。

在具有幾個發電機的線路中，任一支線內電流的變化特性不同到何種程度，可用圖2的線路為例來闡明。當點K發生短路時，通常兩個發電機的電勢可能以不同的速度而變化。所以A和B兩點間的電位差可能在很廣的範圍內變動，甚至會改換極性。這就是說，如果在短路剛開始的瞬間，A點的電壓高於B點的電壓，那麼還有可能在隨後的某一瞬間，兩點的電壓相同，而以後則B點的電壓高於A點的電壓。因此，AB支線內電流的變化，將先減小到零，然後重新增大。

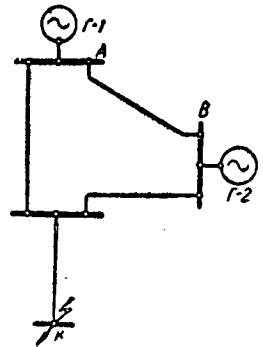


圖3 具有兩個發電機的網絡

第3節 短路的種類

最簡單的短路是三相短路，即三相同時在一點短路。這種短路是對稱的，因為這時每相和正常情況一樣是處在相同情況之下^①，只是電流增大、電壓減低而已。電流和電壓間的相位差與短路迴路電抗與電阻的比值有關，通常較正常情況下要大些。

除三相短路外，其他種類的短路，都是不對稱的，因為那時三相並不處在相同情況之下，電流和電壓系統多少發生畸變。

在電力系統同一地點所發生的不對稱短路，主要的有下列幾種：

① 只有每相所經過的中間電阻都相等時，短路的對稱情況才能保持。