

国外供用电技术

1 9 8 1

电力工业部科学技术情报研究所

前 言

近年来国外供用电技术发展很快。现代供用电设施具有供电能力大、供电质量高、电能损失少、占地面积小及运行维护工作量少等特点。许多工业国家的大中城市已进行了电网的根本改造,在本世纪内可以不必对现有网架作重大改动就能满足供用电发展的需要。在用电企业方面,日益讲究用电技术,注意作好企业内部配电系统的规划设计,综合安排电、热、气的供应系统,尽量减少高峰用电时期的负荷,大力节约能源消费和能源开支等。国外在发展城市供电事业中曾进行过一系列重大的技术决策,开展了多方面的调查研究和科学试验工作,积累了许多经验和技术资料;另一方面也有过一些教训,如在早期发展时缺乏远见和统一的规划,同一地区供电公司过多,电压等级繁杂,供用电设备缺乏标准化规范以及忽视低压配电设备的发展等等。

为了借鉴外国经验,电力工业部生产司委托电力部科学技术情报研究所会同有关单位陆续编译出版《国外供用电技术》专集,供各有关单位参考。在北京、上海、沈阳、武汉供电局(电业局)、电力科学研究院计算技术应用研究所及华北电业管理局供用电处等单位的支持下先后召开了第一集的选题会议及译文技术审核讨论会,选定并组织翻译了有关国外资料,并对其译文进行了技术审议。

《国外供用电技术》第一集的内容系选自历届《国际供(配)电会议论文集》,共包括61篇文章,按上述会议采用的分类方法将文章分成六部分:(一)工业供电系统的设计与规划;(二)变电站设备;(三)电网中的扰动及电网保护;(四)电缆及架空线;(五)公用电网的运行与控制;(六)公用供电系统的设计及规划。大部分文章的内容为针对具体问题介绍试验数据,运行资料或计算结果,如直埋配电电缆的载流量,法国公用配电变压器的鉴定试验及质量检查,英国架空线及电缆网的可靠性等。有一部分文章介绍技术政策和技术原则,如法国配电系统运动化的政策,西德汉堡电网配电系统的长期发展规划等;还有一部分文章介绍设计、研究或试验的方法,如中压电网结构的研究方法,测量谐波阻抗的方法等,这些文章扼要地阐述了解决问题的途径、主要步骤和实际使用结果。

参加本专集选题和译文技术审议的同志有电力工业部上述各参加单位的同志:卢忠轩;黄世洗、黄锦华、姜维高;纪瑞明;涂序泰、薛念抗;周昭茂、查仁柏;周达身;张立志、徐永禧。参加译文技术审议的还有曲涛、胡纪安及林智先同志。陆亚玲、孟达林及弓莉莉同志参加了选题及译文技术审核讨论会及专集编辑过程中的具体工作。全部译文最后由电力工业部科学技术情报研究所编辑及出版。

今后在本专集的基础上还将继续编译出版类似的专集。内容拟从各种国外资料中选取,不断介绍外国新技术和新经验以及适合我国当前需要的传统技术。

《国外供用电技术》第一集在许多同志的共同努力下现在出版了。但由于时间紧迫,加之编者水平有限,内容有不当之处,请读者批评指正。

电力工业部科学技术情报研究所

一九八一年十一月

目 录

第一部分 工业供电系统的设计与规划

1. 工业电网的电压选择和设计..... (1)
2. 大电流问题: 目前的解决办法和开关的发展动向..... (7)
3. 大型工厂一次配电系统解决短路应力增加问题的一些方法..... (13)
4. 大工业配电网采用660伏和10千伏电压的 经 验..... (20)
5. 企业供电可靠性的分析..... (28)
6. 商业中心和大楼的配电、保护及安全措施..... (35)
7. 大型工业联合企业的配电..... (43)

第二部分 变电站设备

1. 日本真空断路器应用的最新发展动向..... (49)
2. 真空及六氟化硫断路器用于中压配电装置时的开断过程..... (54)
3. 箱式中压/低压配 电 站..... (64)
4. 用于箱式配电站的工厂装配式12和24千伏设备..... (74)
5. 法国公用配电网变压器的鉴定试验和质量检查..... (83)
6. 封闭式配电变压器..... (90)
7. 树脂浇铸固体绝缘配电变压器的负载..... (95)
8. 中压/低压单元式配电站的运行经验和发展趋势..... (101)
9. 装有并联电容器的高压/中压变电站在开断短路电流时产生的过电压..... (108)
10. 住宅区变压器的噪 音 问题..... (112)
11. 有关浇铸树脂变压器应 用 的 一 些 问 题..... (117)
12. 自动投切的 电 容 器 组..... (128)
13. 配电变压器的经济负 荷..... (134)
14. 配电网络中的 变 压 器 负 荷..... (142)
15. 配电站中开关装置和变压器 的 可 靠 性..... (147)
16. 变电站设计对于大城市用户供 电 可 靠 性 的 影 响..... (157)

第三部分 电网中的扰动及电网保护

1. 家用电器在配电网络中引起的 干 扰..... (167)
2. 法国配电系统远 动 化 的 政 策..... (177)
3. 利用移动式无线电通道监控 农 村 配 电 网..... (182)
4. 稳态谐波分析 的 数 字 方 法..... (187)
5. 测量谐波 阻 抗 的 方 法..... (190)
6. 变电站 的 计 算 机 监 控..... (193)

7. 中压电网结构及其保护系统设计对供电可靠性的影响.....	(198)
8. 微处理机系统在变电站自动控制中的应用.....	(203)

第四部分 电缆及架空线

1. 交链聚乙烯低压电缆在西德公用配电网中的应用.....	(208)
2. 12~170千伏挤压型绝缘电缆中间接头.....	(213)
3. 西德中低压电网绝缘架空线发展近况.....	(220)
4. 用玻璃钢绝缘横担将66千伏线路升压为132千伏.....	(228)
5. 最新电缆故障探测法.....	(232)
6. 架空线聚合物绝缘子.....	(239)
7. 瑞典聚合体绝缘电力电缆的设计、寿命试验及其运行经验.....	(244)
8. 电力网络中地下电缆的铝导线连接技术和试验规范的选择.....	(249)
9. 铝导线连接金具的腐蚀试验方法.....	(257)
10. 英国架空线路和电缆系统的可靠性.....	(265)
11. 直埋配电电缆的载流量.....	(272)
12. 直埋电缆的发热计算和一些技术问题.....	(280)

第五部分 公用电网的运行与控制

1. 远方控制的中压线路开关.....	(286)
2. 估计使用中电度表准确度的抽样统计法.....	(292)
3. 在低压电网中用不连续信号对伦敦地区用户的负荷实行集中远方控制.....	(300)
4. 配电系统设计、运行和保护的经验.....	(306)
5. 一种通过电网独立控制的新型信号传送系统.....	(313)
6. 配电网络在雷击情况下的工况分析与改善措施.....	(320)
7. 降低工厂对电压突降敏感度的实用方法.....	(325)
8. 高、中压电网中由带相位控制的用电设备产生的谐波.....	(334)

第六部分 公用供电系统的设计及规划

1. 中压电网结构的研究方法.....	(338)
2. 配电系统规划用的基本数据和电量——负荷曲线的应用.....	(344)
3. 根据汉堡电网提出的配电系统长期发展规划.....	(349)
4. 公用配电网内负荷与用电量之间的关系.....	(360)
5. 中压电网规划中的连续供电问题.....	(367)
6. 提高连续供电的水平及其相应的费用.....	(374)
7. 工业的配电电压.....	(381)
8. 加拿大魁北克地区的大城市供电.....	(386)
9. 新住宅区内供电系统的最佳结构.....	(394)
10. 都市地区配电网研究.....	(402)

第一部分 工业供电系统的设计与规划

1. 工业电网的电压选择和设计

Eberhard Steiniger (西德)

提 要

在工业供电电网中，工厂的自动控制和设备方面的技术发展促使对高低压电网的合理用电电压，工厂电网的专用型式和设计加以选择。这些问题在本文中予以说明。

一、序言

工业供电网络的一个典型特点是具有很高的负荷密度。在化学、石油化工和钢铁工业中，负荷密度达到或超过每平方公里10万千瓦的情况并不罕见。除了高负荷密度以外，耗电量很大的用电设备，例如25万千瓦的压缩机电动机、电解设备和电炉等给供电带来了更多的问题。

工业电网要求具有很高的供电可靠率，由于供电中断而造成的停产损失，代价高昂，更不用说还有可能发生危险的情况了。

工厂企业用电的年利用小时数可高达八千小时，因此要求供电的损耗要低。这就要在不降低供电可靠率的基础上，使基建投资与预计期限——例如10年——内的运行费用之和减至最少。不同类别的工业对工业电网的布局和工厂的电气设备有不同的优先考虑的重点。影响较大的问题有：是连续还是不连续生产；自备电源还是外部电源供电；化学和采矿工业的防爆要求；大型驱动设备的供电等。在特殊的情况下，可能还要考虑很多不同的要求。但是某些基本问题则是工业电网的设计者和使用者都必需考虑的。

二、工业电网的电压等级

1. 低压电网

首先研究低压电网。在用户总数中，使用低压电动机的占绝对多数。例如，在西德路德维希哈芬的巴登苯胺烧碱公司 (BASFAG) 的工厂中共装有125,000台电动机，其中仅有1000台是高压电动机。在124,000台低压电动机中，按其功率大小可以分为以下几组：

54%	3 千瓦以下。
28%	3 到10千瓦。
16%	10到50千瓦。
2 %	50到250千瓦。

但是1000台高压电动机需要的电能是电动机总能耗的65%，而低压电动机仅耗用35%。

自上一世纪末以来，在化学和钢铁工业中已采用三相500伏系统作为低压电网的供电电

压。500伏的电网在过去有了很大发展，但在将来它将越来越失去其重要性。1973年6月颁发的德国工业标准（DIN）40002第11页仅在注解中提到这个电压。目前，在工业电网中普遍采用380伏三相系统。它可以向照明并通过插座向轻便型用电设备供电。较大的电动机可以采用星角变换开关起动。

苏联1965年采用新的660伏（ $380 \cdot \sqrt{3}$ ）电压等级，几年后在整个东欧国家里都采用了。前几年西德的某些工厂也设计采用了660伏电网。同时电气制造工业也研制了建设660伏电网所需的设备。虽然如此，工厂企业并未大力推广新的电压等级。耗电量大的工业电网采用660伏电压具有以下优点：

（1）根据动态应力的限制，在短路电流有效值 I_{eff} 不超过50千安的条件下，可以加大变压器的最大额定容量。下列变压器最大额定容量是可以做到的。

380伏	2000千伏安
500伏	2500千伏安
660伏	3500千伏安

在任何情况下都安装最大额定容量的变压器是否合理，将在后面加以讨论。

（2）低压电动机的最大额定容量可以做得较大。由于技术和经济上的原因，低压电动机的极限容量如下：

380伏	220—250千瓦
500伏	250—350千瓦
660伏	450—500千瓦

经济容量的极限是由低压变压器的容量、开关和保护设备等确定的。

（3）对于同样的传输功率，电缆截面可以较小。

（4）使用的开关设备的额定电流较小。

（5）电缆中功率损耗较小，因而温升也较小。

（6）在电动机起动和正常运行时，电压降较小。

（7）对称的三相用电设备在380伏电网中可以接成角形，而在660伏电网中可以接成星形。

在西德的工厂中采用660伏电压有一个缺点，即根据德国电气工程师协会（VDE）的规定，660伏电网仅能使用电缆供电。明线电压最高只允许500伏，而室内装配通常都采用明线，大约较同样截面的电缆便宜30%。

在巴登苯胺烧碱公司的两个化学工厂中，使用380伏作为标称供电电压，与660伏供电的估计费用对比，结果是：对于具有15千瓦或稍大一些的中等容量电动机的电网，当电动机总容量在250千瓦到500千瓦之间且电缆较长时，采用660伏供电较为有利。根据计算可降低工厂的电气费用10%到15%。

2. 高压电网

在西德，380伏或500伏电网的上一级电压通常是6千伏，在某些情况下为5千伏；对于660伏电网，最佳电压为10千伏。

在使用6千伏电网的工厂中，高压异步电动机的容量在6千千瓦以下，如果供电变压器容量够大，可以直接起动而不致过份影响其他用户。更大容量的电动机必须由单独的变

压器供电。

在6千伏电网之上可以叠加一个20、25或30千伏的中压电网，或者直接由110千伏高压电网供电。10千伏电网应该直接由110千伏电网供电，而不必有一个中压。

下列电压系统都在使用：

三级电压系统：0.4/6/110千伏

0.66/10/110千伏

或四级电压系统：0.4/6/20/110千伏

除上述电压等级外，根据各工厂或企业组合的电网历史形成，当然还有其他的电压等级。

总起来说：由外部电源供电，容量在5万千瓦以下的工业电网可以选择三级电压电网。对于耗电量大一些的工业来说，自然需要较大的电网，从技术和经济的观点而论，四级电压系统将更为有利。在工厂内部有几台发电机，且发电较多时，则需有20千伏或最好30千伏电压等级。

3. 配电网络系统

下面由已有的和可能有的多种工业配电网型式中举出三种常用型式。

(1) 中心馈入式电网 这种电网的特点是结构简单明晰、造价低、保护简单。在某一电压等级发生故障未消除以前，其以下各电压等级电网的供电将中断。如要提高供电可靠率，需由第二个主电网提供另一个电源，形成双路供电。在这种情况下，投资将加倍。可以在所有的电压等级上或仅在选定的电压等级上安装联络开关；这样，在故障停电时，配电网络的未损坏部分可以切换到第二个电网上去。当然，两个网路都必须能够供应相应的每一电压等级的总用电量。

这种双电源中心馈入式网络在化学、石油化工和钢铁工业中较常用，它能保证较高的供电可靠率，对于各种用电大小的工厂都能适应。

(2) 环形闭式电网 环形闭式电网是为在一较大区域内散布着的一些小用电量的工厂而设计的。在这种情况下，同一电压等级的若干用户都由一个电缆网络供电。全部环网内的电缆截面均应能满足网络总用电量的要求。

在单一馈线环形闭式电网中，电缆网络的两个末端都接在同一母线系统上，正常情况下环网闭式运行。两路馈入式环网可以获得较高的供电可靠率。在这种情况下，环网由两个不同的母线供电，按开环运行。环网可以在任一点开环，这样对重要用户可以有两个独立的电源。环网是向只有比较小的负荷的大电网供电的电力供应系统。见图1。

(3) 互连电网 互连电网是在过去大的500伏电网中建设的，现在它们仍在 使用。其优点是供电可靠率高和电压稳定，网络及变压器损耗低，且有易于扩充的可能性。没有其他网络能获得互连电网这样高的供电可靠率。网络中运行元件的故障可由保险器和断路器在短时间内隔离和断开，通常用户都感觉不出来。其缺点是电缆投资高，相对来说保护的工作量较大（要采用特殊开关），且仅由一个高压电网供电。

三、工厂电网设计

在中小工厂，所有用电设备都由一个单母线或双母线系统的中压开关装置供电，在比较大的工业联合企业中，如通常的化学、石油化工和钢铁工业，都包含有不同生产过程的若干个工厂。工业联合企业必须尽可能避免由一个工厂对另一个工厂的供电产生干扰。每

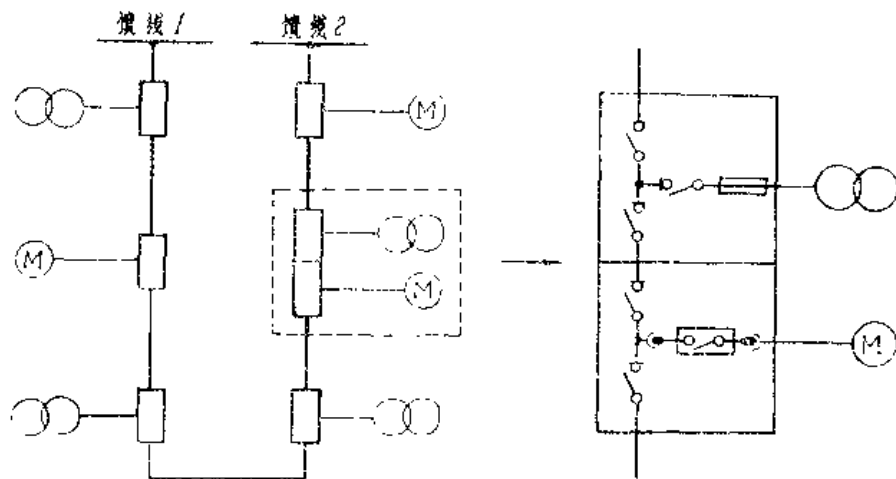


图1 两路馈入式环形闭式电网

一个工厂应有直接连接在配电网中的独立电网。如果工厂分为几个并列的生产线，则供电网络及其监视系统必须按生产线分别构成。采用这种方法，电气系统中的故障仅影响与其有关的生产线，而工厂的所有其余部分仍能保持正常运行。因此，每个工厂应尽可能划分为若干运行单元。这样作，由于不能采用最大额定容量的变压器和开关装置，投资较高。但把工厂分为小的单元，能够防止经常造成损失的全部生产中断，这个较高的投资很快就会得到补偿。

现在以图2所示假设的工厂的供电系统来说明某些设计要点。这个工厂由从两个独立电网馈电的两台变压器供电。变压器的容量决定于工厂的总用电量和最大的单个用电设备的容量。每一台变压器都能供应整个工厂的用电。由这些变压器馈电的6千伏开关装置的额定短路容量 S_k 等于400兆伏安。

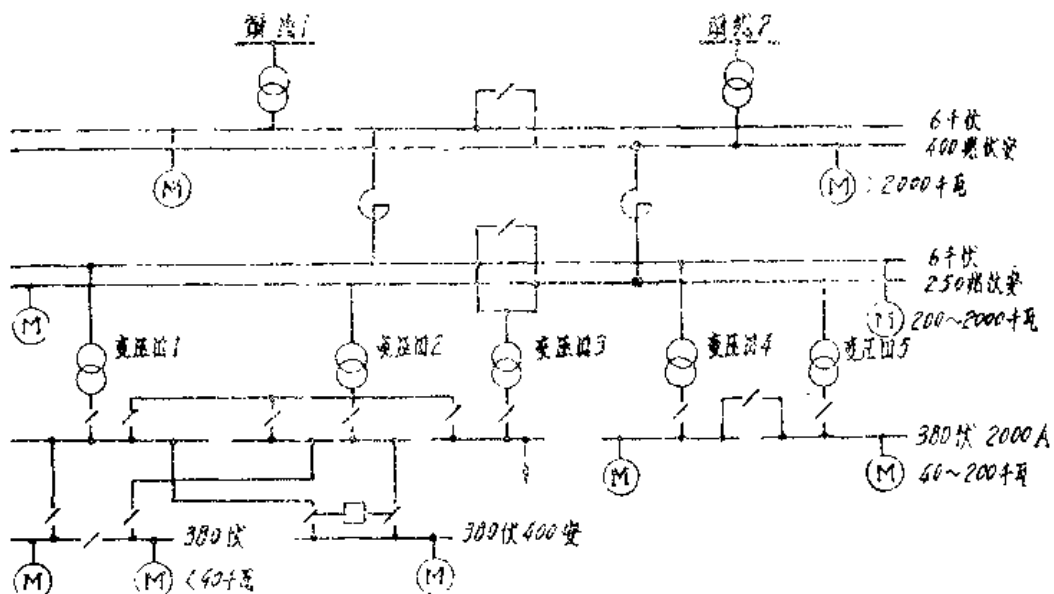


图2 工厂供电原理图

这些开关装置是由预制的、没有隔离刀闸的金属配电柜组装起来的。容量大于2000千瓦的6千伏大电动机可由这个开关装置供电。具有250兆伏安断流容量的下一级6千伏开关装置则通过电抗器受电。

400兆伏安与250兆伏安配电柜的相对价格比值约为2:1。如果工厂装有多于5~8台，容量为200~2000千瓦的6千伏电动机和6/0.4千伏的变压器，则安装电抗器和相应的馈入盘及分支是合算的。在工厂中6千伏开关装置的断流容量不应超过400兆伏安。短路电流有效值达到40千安时的动态应力和电弧作用的后果，开关装置可以耐得住，但其他电气设备则已达到允许的极限值。例如，如图8所示，比较高的短路功率将使连接电缆尺寸增大很多，一台300千瓦的电动机由遮断容量为200兆伏安的开关装置供电时，能用截面为70平方毫米的铜芯电缆联接，而由600兆伏安开关装置供电时，截面为185平方毫米的铜芯电缆理论上仍不能满足要求。

为向低压供电，安装了5台每台容量为1250千伏安的变压器。两台为主生产线供电，一台备用。另两台供应辅助性厂房。这样的安排可以对独立的生产部门分别供电。

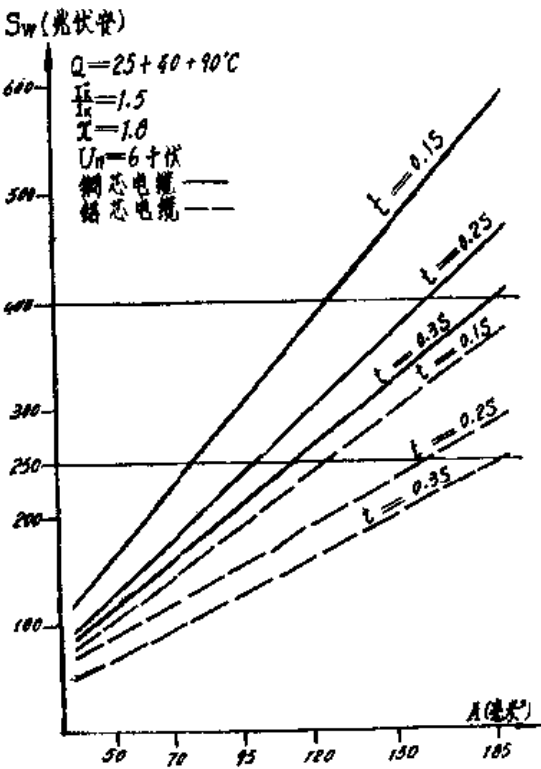


图8 电缆的最小截面

给低压主配电网供电的变压器母线额定电流为2000安，由此母线可以直接连接容量40~200千瓦的电机。较小的电机则通过母线额定电流为400安的电动机控制箱(MCC)连接。这样作不但能降低造价，而且技术上也有好处。在化学工厂中，96%的电动机的额定功率为40千瓦以下，使用电动机控制箱可以有效的降低造价。

在变压器及电动机控制箱之后的各用电设备按生产过程分为几个组。在故障的情况下，只有明确规定的工厂某些部分允许无电。变压器1和2可以带额定负载，因为有一台

备用变压器可以轮流连接到任一主配电母线上。而变压器 4 和 5 每台仅能带额定值一半的负荷，因为它们要互为备用，每台变压器均应能负担另一台的负荷。

配电装置容量比较小的另一优点是：配电装置可以紧靠用电设备安装，与电力中心分开，遍布于全工厂，以及电动机的电缆较短。这样还可以解决大容量多支配电装置引起的电缆过份集中所造成的温升和缺乏安装空间的问题。

在现代化安装紧凑的工厂中，怎样安排电缆所需沟道和托架的安装空间经常是个问题。在较大的工厂中，可以采用地下电缆系统，这样防火性能较好。缺点是以后再增设电缆时，挖掘地沟的费用较高。而采用地上电缆系统则无此缺点。

地下电缆系统的一条缆沟中敷设有很多电缆时，电缆缆芯尺寸大小的选择是一个现实问题。现有规程对选择不同截面和不同电流的平行电缆尺寸大小的帮助不大。文献中介绍的计算原则是不适用的。这就造成不是电缆尺寸选择过大，就是产生热过载而缩短绝缘寿命。因此巴登苯胺烧碱公司研制了一套考虑到计算出的地理电缆周围温度分布、土壤热阻、距地表深度和电缆间距离等因素的计算机程序，它能确定最佳的电缆缆芯尺寸。

从几个开关站或变电站向一个工厂分散式供电的概念是和现代控制和监视技术协调一致的。越来越多的工厂将由中心控制室或控制中心控制。通过多芯控制电缆从这里对配电装置供应电动机的分支线进行控制。工业电网的网络计算同样也很重要。对于较小的网络，虽然需要较长的计算时间，但仍可采用通常的计算方法。对于较大的网络，人工计算几乎是不可能的，仅能在计算机帮助之下进行。现行的程序除可计算短路电流外，还能计算负荷潮流、网络保护、大型电机起动时的电压降等。

当电压短时中断后，整个电网用电设备再起动时的电压降计算非常重要；但无论是用常规方法，还是在计算机帮助下，进行准确计算几乎是不可能的。在发生短路故障停电时，配电网的停电时间在 0.1 到 0.15 秒之间。在这个时间内，异步电动机的滑差已超过崩溃滑差值，因此在电压恢复后，电动机的电流值增大到接近起动电流值。这对网络将造成很大电压降并影响其他用户。为此研制了特殊的计算程序，用以模拟电网电压降低时驱动电动机的动态反应。其结果可以用曲线给出。例如：大型发电站的厂用电系统由单元变压器切换到起动用变压器供电时的动态反应可由此程序算出，并能优选网络元件。在一般情况下，对工业电网进行这种计算是过份的。

在工业电网中的实测表明，当电压下降 0.48 秒后，6 千伏开关装置处的电压下降到额定值的百分之四十，在电动机控制箱处的电压也将相应的降低。如果控制电压直接接在电力线路上，这样的电压降将使所有低压开关装置的接触器脱扣。如果接触器由另一独立的控制电压供电，当供电电压恢复时，由于电动机转矩按电压的平方下降，电动机不能使被驱动的机械加速。电动机将由热力过载保护动作而断电。因此，当变压器满载运行时，仅有一部份负荷可以直接再起动。当进行工厂设计时，需根据生产过程的重要性，对允许直接再起动的电动机进行严格的挑选，不重要的用电设备必须予以切除或分批再起动。

上面所阐明的设计观点，如设法选用较小容量的变压器、开关装置以及将负荷分组等办法，不能适用于每种情况。也许只是化学工业电网构思中的一个专有问题。尽管如此，除前面已提到过的优点以外，也许还有其他重要优点，只有在开关装置、变压器、开关设备的组合等的详细设计作出来以后才能知道。当所有的工厂和建筑物如集中的动力厂、实

验室、仓库和大负荷厂房等都采用这种统一的技术措施以后，将能降低设计、建设费用，同样也能由于备品备件的减少而降低运行费用。

(国际供电会议论文集1979年第7号论文 邓齐彬译 纪瑞明校)

2. 大电流问题：目前的解决办法和开关的发展动向

J. Hennebert P. Niel (法国)

提 要

电力系统中超过3000安的大电流是不可避免的，虽然只有少数场合采用这样大的电流。大电流设备越来越超出标准范围，是仍然采用特殊设计设备有利？还是使用标准设备更好？用目前的技术和关于并联开关的知识已经能够作出令人满意的设计。利用这些经验就能够解决大电流所引起的问题，就能找到技术上和经济上都是最佳的解决办法。

一、序言

过去10年间，发电厂和工业企业需要的动力不断增加，在开关制造厂产品的工作电流越来越大，已超过了3000安。最常用的电压是7.2千伏，因为这个电压同大容量旋转电机的绝缘仍然是能配合的。

要特别指出的是核电站的7.2千伏厂用变压器容量的增长（130万千瓦机组的厂用变压器每个绕组的容量由2.8万千伏安增到3.6万千伏安）要求将断路器的额定电流从2500安增到3150安，切断短路电流的能力从40千安增到50千安。汽车工业和钢铁工业使用更高电压，也需要较大的电流。另一个例子是采用磁吹断路器的水电厂。水电厂自1975年已有一台5000安断路器在运行，世界上还有其他实例。

二、总的情况

大电流断路器的问题同别的大电流的电气设备相同，即通过大电流时不能导致设备工作特性的改变。因此，主要是温升问题，实际上主要是触头温升问题。

要使设备特性不因温升而改变，必须保持以下几项不变：1. 绝缘质量，2. 触头上的应力，3. 触头表面的状况。

1. 大电流断路器的冷却（热交换）有几种方式，其热交换的一些情况如下：

(1) 传导热交换：无须物质流动，热流主要通过导体本身，但是在较小程度上，绝缘也起传导作用。在有硅质充填剂时，高压开关中广泛采用的环氧树脂的导热系数将从0.18大卡/小时·米·度提高到0.8大卡/小时·米·度。

(2) 对流热交换：有物质流动，物体表面的冷物质层不断地被冷的新物质更换，从而对物体进行冷却。冷却剂是流体。对开关来说，是指装在小容器中的SF₆或油。对于容器则部分地由空气对流冷却。对磁断路器来说，则完全由空气冷却。

断路器是一个保证安全的单元，用户要求它简单可靠，因而只偶而接受强制风冷方

式。将来只考虑采用自然对流冷却。

对流冷却所消散的热量与热交换面的状况关系很大，同冷却面（与流体接触）的物质无关或关系很小。它同被冷却物体的温度的1.25次方成正比。

在开关柜中断路器，电缆头，互感器及母线的发热量只能通过开关室（房间）中尺寸适当的开口由自然空气对流消散。

（3）幅射热交换：这是一种电磁现象，可以通过物质，也可以不通过物质来实现交换。散放出来的热量主要同幅射体的温度有关，也同幅射体的性质及表面状态有关（Stefan-Boltzmann定律）。此定律的数学方程看起来虽然简单，但应用到开关电器上是困难的，因为各表面（断路器与周围物体之间）互相反射。关于表面状况的影响可以指出：氧化铜表面幅射出来的热能为光滑的铜表面的20倍。

在一些装在环境温度不变的场所的设备中，其幅射消散热量同对流消散热量基本上同一个数量级。全封闭开关电器就不是这样，幅射热量只占总热交换量的5~10%，可以忽略不计。

逐个地比较设备各部分的传导和对流热交换量是有意义的，它们一起必须能够消散所产生的热量；对断路器室进行的比较特别有意义。

2. 断路器的传导和对流冷却：在电路中，有可分触头联接的元件所承受的应力，比其他用螺栓联接的元件要大。此外这些可分联接是靠近电弧的。可以认为，断路器所受的应力是较为严重的，它们应该比开关柜的其他部分受到优先的对待。事实上断路器的设计应该做到主触头基本上不受断流过程的影响。这一点SF₆断路器和磁吹断路器是能够做到的。此外设计还必须不使触头邻近导体的尺寸过大，否则总体成本太高。设计开关柜及其通气开口要考虑到断路器的存在及它在额定电流下的性能（发热），必须留有裕度。

在适当的技术和经济条件下，必须将发热量减到最低，才能得到额定电流大的断路器。

必须小心设计套管。所有拉出式（手车式）断路器以及固装式或拉出式的SF₆断路器和磁吹断路器都装用套管。

装在开关柜中带金属外壳的SF₆断路器，不论是分箱式还是三相共箱式，其外壳须遵从前述冷却规则。通过套管消散的热量不可忽略，虽然其量是小的。电压低，套管短，更是这样。

断路器极所消耗的功率是由SF₆气体传到外壳的。同在空气中一样，热交换是通过对流和辐射、在较低水平上也通过传导来实现的。

磁吹断路器的通电流部分不加封盖，可以通过周围空气的自然对流来冷却。金属套管增加对流冷却的效果，因为它完全与空气接触。

3. 用环形电流互感器调节电流分布

大电流开关设备中常用环形电流互感器（下面称作环形线圈）来改变环路中的电流分布。它的工作原理如图1所示。回路有支路1和2，各装有环形线圈，互相串联，它们的二次绕组匝数不同，绕制的方向相反。

环形线圈2产生电压为 u_2 ， u_2 的方向同本支路的电流方向相反。它的二次侧感应出一个电压，此电压又使互感器1的一次侧产生一个电压。后一电压使支路1的电流增加。

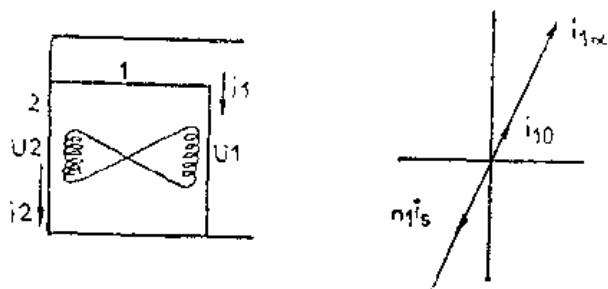


图1 采用环形线圈调节电流分布

设“ i_1 ”和“ i_2 ”分别为自由分布时两支路的电流，“ i_{1a} ”和“ i_{2a} ”为希望得到的支路电流，而且 $i_{1a} > i_1$ ， $i_{2a} < i_2$ ； i_s 是稳态情况下环形线卷二次侧的电流；线卷的匝数分别为 n_1 和 n_2 。在稳态情况下：

$$\begin{aligned} \vec{i_1} + n_1 \vec{i_s} &= \vec{i_{10}} \\ n_2 \vec{i_s} + \vec{i_{2a}} &= n_2 \vec{i_{s0}} \end{aligned}$$

如一次和二次电流不同相位，如图1所示，则上式可以写成代数式，即：

$$i_{1a} - n_1 i_s = i_{10} \quad (1)$$

$$n_2 i_s - i_{2a} = n_2 i_{s0} \quad (2)$$

从(1)得

$$i_s = \frac{i_{1a} - i_{10}}{n_1}, \text{ 代入(2)得}$$

$$n_2 i_{1a} - n_1 i_{2a} = n_1 (n_2 i_{s0}) + n_2 i_{10} \quad (3)$$

上面已表明，用环形线卷器调节分支电流，只有在励磁电流能够忽略（即当工作磁通密度低）的时候才是完善的。从(3)可以看出，电流 i_{1a} 和 i_{2a} 越大，励磁电流的影响越小。如果估计产生的误差太大，可以把负载最重的支路的二次电流提高，此时情况即可改善。利用这两点，环形线卷就可以在高磁通密度下工作。

三、目前的解决方案

大额定电流的解决方案同断流技术有关，目前的解决方案有两个不同类型：(1)用油断路器(2)用磁吹和SF6断路器。

1.油断路器方案：这里大电流的主要问题是油温度的确定，要考虑主回路吸收的和外壳散放的能量。从金属到油的热传导系数很高，选定适当的主回路导体尺寸是容易的。

单极断路器可达2500安。配上吹拂力强的灭弧室，能够在7.2千伏开断80千安。

负担工作电流的触头和燃弧触头都采用触指式。由于电弧对燃弧触头起氧化作用，触头电流很快就会达到它的极限，因此产生了每一断路器极用一或两个隔离开关极同它并联的概念。有两种做法：

采用断路器极作隔离开关。这些断路器极一般互相对正布置，而在联线（母线）上并联。作断流和作隔离用的断路极完全相同，每极的“隔离”动作是通过适当的联杆来实现的。

使隔离极比断路器极先开后合，并不带负荷操作。每相用两个2500安极，则额定电流可到4000安。如果配用上述环形线卷，改善电流分配，则可达4500安。

环形线卷装在断路器的进线上，常装在开关柜上。这里两极的环形线卷是相同的，两极的电流分布是一样的。

采用隔离器极同断路器极不一样。隔离器极直接与灭弧元件并联。隔离器极技术是基于这样的事实，即它的触头不受到电弧电流的作用，它是特别设计来承担额定电流的大部分的。这类断路器有散热片以提高散热。两个环形线卷分别装在断路器及隔离器回路中，都装在隔离器极的上面。通过这一办法，可以得到7.2~24千伏，5000安（用1隔离器极）和8000安（用2隔离器极）的额定电流。

采用环形线卷和两个隔离器的断路器的电流分布为：隔离器极6000安，断路器极2000安，可见环形线卷对调节电流作用之大。

2. 磁吹和SF₆断路器方案

磁吹断路器的带电部分由大气直接冷却，它的载流能力可以做到每极3500~4000安（视开关柜型式而异），消弧室顶部和底部敞开，使空气能自由循环流通。从技术上看，可以做到负担工作电流的触头同消弧罩完全分开，因此630安或4000安断路器极都可以“戴”上开断能力为500~1000兆伏安的消弧罩。

作隔离器用时可以不“戴”消弧罩，但为了在分闸时容易切换电流，可以“戴”上小号消弧罩。断流部件（其质量随额定电流而增加）在分、合闸时运动速度慢，因而操作机构需用的功率只是中等的。分闸时电磁效应使电弧运动；合闸时，由于燃弧触头的形状，会产生电磁吸力，因而机构所需的功率小，用标准操作机构不难把额定电流提到两倍。

大电流SF₆断路器结构有三个优点：（1）SF₆有很好的绝缘能力，因而载流部分较短，损失也较小。（2）耐弧触头与工作电流触头分开，使后者的触指数目可以做得大，特别是采用压气式技术更是如此。（3）SF₆气体的散热能力较好。

SF₆断路器的额定电流只受到经济条件的限制，通常当工作电流触头的环冠（即触指指环的大小。触指作环状布置）尺寸大约与消弧装置的相同的时候，就达到了经济的平衡。不管断路器是分相结构还是三相共箱式，经济的工作电流都随开断能力而增加。

已经生产7.2千伏、3150安、能开断63千安的三相共（金属）箱断路器和36千伏、电流在2500安及以下、带绝缘外壳的断路器。

工作电流触头的环冠决定断路器的额定电流值。

更大的电流则可以象油断路器那样加装并联断路器极。加装的并联极可以取消压气装置。采用这个办法可以制造6000安的开关柜，其宽度为正常柜的两倍。电流分配由装在柜内的环状线卷调节，其工作原理上面已作介绍。

可能解决的办法：从结构上看，断路器或断路器极的并联，有几个很重要的考虑：

如果断路器是固定式（很大额定电流的断路器属这种类型），可以有不同的结构：

（1）用一个特别设计的底架，安装6或9个断路器极（看电流要提高到2倍或3倍而定），合用一个操作机构。

（2）它由2个或3个标准单元组成，每个单元有自己的操作机构。如果用户要求各相分开，可以用三个标准单元，每个有三个极并联，就能够做到三倍额定电流，它们的三个

电动机构是相互联锁的。

如果断路器是拉出式（手车式），那么采用单底架时额定电流只能到两倍，否则间隔宽度就太大了。断路器或断路器极的并列布置示意图见图 2。

关于并联的方法还要考虑其他问题，包括并联的接法：

（1）在母线侧并联时，可以直接接到母线上或者接到运动部分上。

（2）在电缆侧并联则接到活动部分或接到固定部分，或者接到在开关柜内的电缆头。在后一方式，电缆数目必须是双数，每个断路器上接一半电缆。电缆的阻抗自动地决定了电流的分配。

按其复杂程度排列，各种联接布置的顺序如下：

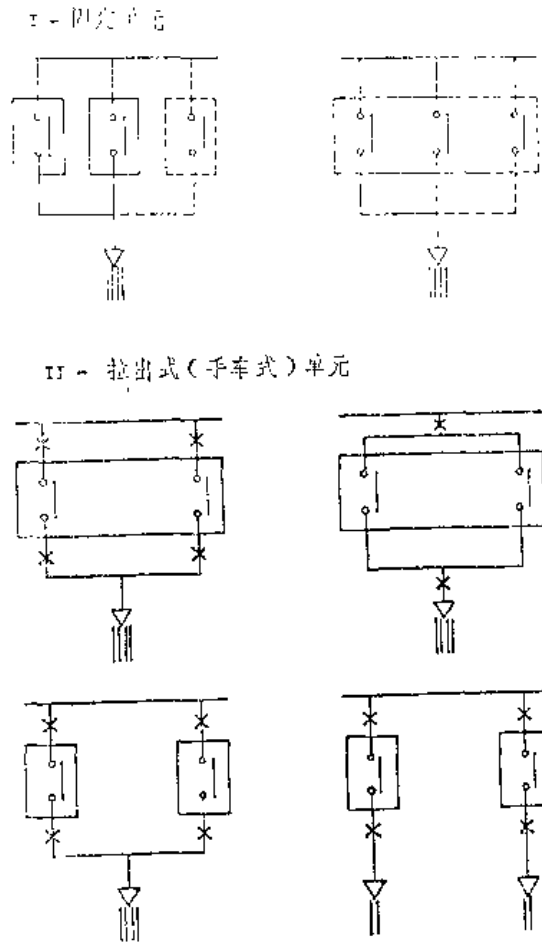


图 2 断路器并列安排的各种方式

- （1）单底架和单操作机构，
- （2）标准单元的并联是在运行部分一侧，
- （3）标准单元的并联是在固定部分一侧，
- （4）没有任何并联的联接。

从经济角度看，采用最后方式是有利的。

由标准断路器组成并联断路器时使其中一台专门负责断流比较有利。其工作原理是：

用第一台断路器作隔离器，分闸时先打开；第二台断路器则在合闸时先合上。两台断路器互相联锁。

在分闸中作隔离器的断路器中产生弧压（电弧电压） u_a ，逐渐地把隔离器的电流转换到作断流用的断路器上（见图3）。断路器可比作一个电感 L ，弧压可当作不变看，从而获得：

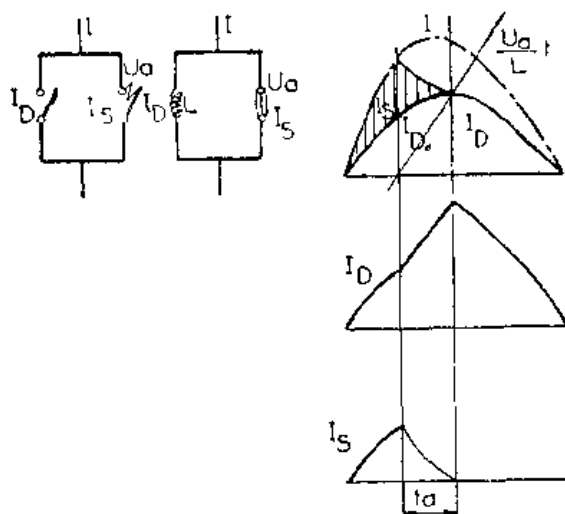


图3 并联断路器的开断

$$u_a = L \frac{dI_D}{dt} \quad \text{即} \quad I_D = \frac{u_a}{L} t + I_{D0}$$

$$\text{和 } I_s = I - I_D$$

其中 I_{D0} 是当隔离器触头分离瞬间流经断路器的电流。

电弧电流 $\frac{u_a t}{L}$ 越高则燃弧时间 t_a 越短。因此应减小 L ，即减少断流支路的电感（断路器代表的支路长度）。

曾对由两台 SF_6 24千伏、1250安并联起来的断路器（构成1台2500安断路器）进行试验。跳闸讯号同时加到两台断路器上，但第1台断路器是在第2台的极限辅助接点接通时才动作，两台断路器是分级先后动作的。试验表明，电流以第1台断路器切换到执行断流的第2台断路器是很迅速的，大约只有一毫秒。

从上面的分析可见，对 SF_6 断路器来说，采用两台并联开断是适合的；用环形线卷调节电流分布，则使用相同设计的开关柜（组成部件相同），基本上可以把额定电流提高到两倍。断路器须是小尺寸的，这样的布置才是有利的，三相共箱的 SF_6 断路器就属于这种情况。装用此类断路器的开关柜的宽度为750毫米。两个相同开关柜构成的6000安的开关柜的宽度将是1500毫米，同使用油断路器相比有显著的节省。用油断路器的4000安开关柜的宽度为1850毫米。

用这种布置的优点还有：对更高电压可以使用外推法。

磁吹断路器极的宽度小，因而开关柜尺寸不大。例如7.2千伏开关柜的宽度为650~

900毫米。在单底架开关柜，额定电流已做到7000安。但同前面情况一样，从经济观点看，使用标准单元和单独的操作机构是有利的。

上面关于电流超过3000安的论述，都适用于较低电流，直到1600安，只要是尺寸合理，更主要的是只要成长合算。

结论：大额定电流断路器的制造是一个复杂的研究工作，要考虑各种有关问题，主要是温升问题。

大电流断路器市场需要量少，值得继续采用并联断路器和并联开关柜的办法。主要的优点是这个办法能够使用大量断路器和开关柜的标准部件。

(国际供电会议论文集1979年第2号论文 甘澄译译)

3. 大型工厂一次配电系统解决短路应力 增加问题的一些方法

A Bastianello G Spegiorin P Baioni E Clerici (意大利)

摘 要

本文介绍一个大型化工厂自备电厂的一次配电系统，因用电负荷和发电设备的增多，以及公用电网的扩充等原因，致使短路功率增加到超过一次配电系统原设计值时的各种加强方案。

一、序言

该大型化工厂的用电负荷达几十万千瓦，在正常情况下，由工厂的一次配电系统与公用电网联网供电。配电系统通过三个150千伏级变电所，将工厂用电负荷与自备电厂连接起来构成环网，同时又通过SS I和SS II两变电所的两回进线与公用电网相联（参见图1）。

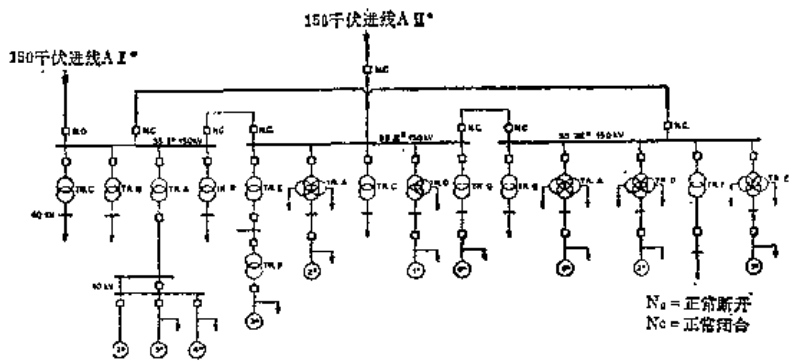


图1 一次配电系统