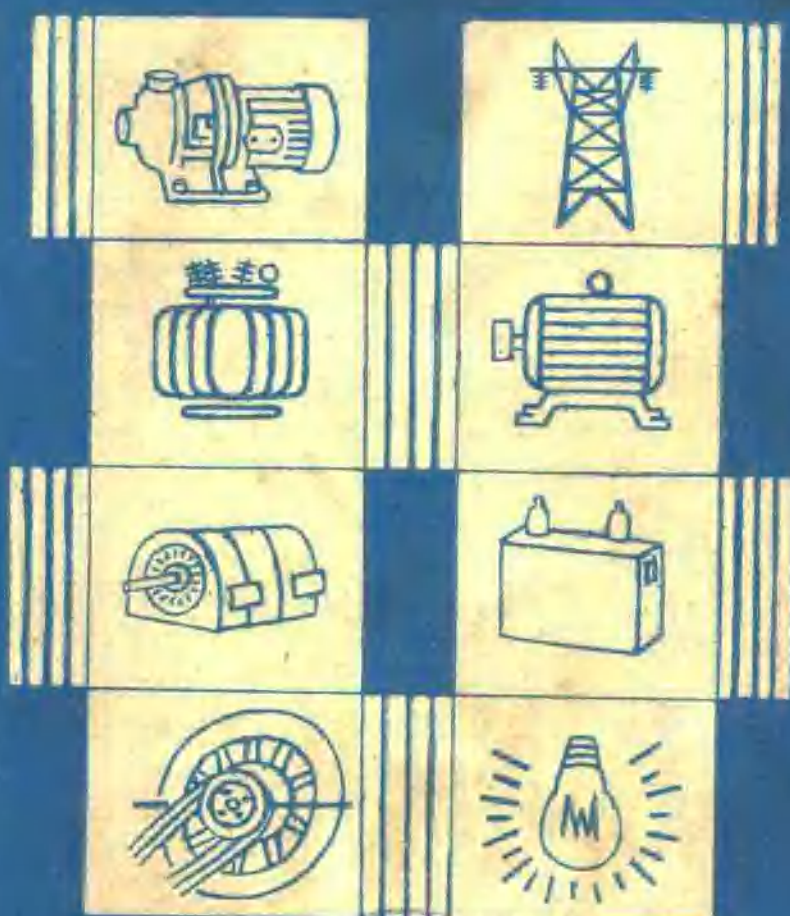




节约用电基础

用电管理培训讲义

东北电业管理局抚顺电业局
华东电业管理局
上海市总工会沪西职工技术交流站

前

电能作为电力工业的一种特殊产品，已成为发展国民经济和人民生活必不可少的二次能源，在电能供应短缺的情况下，搞好安全、经济、合理用电与节约用电，提高全社会的经济效益，是促进国民经济顺利发展的重要保证。本书是将《抚顺电力》发表的节电技术培训材料专辑，《电力能源的合理使用》经过重新修改补充，改为《节约用电基础》，以适应当前用电管理在职培训和自学的需要，主要阐述了电力能源合理使用的基本概念，电能利用率测量与计算，提高供电效率减少供电损耗，无功功率与功率因数的改善，电动机节电，风机水泵节电，减少传动摩擦损耗，电炉设备节电，远红外加热技术的应用，照明设备节电，还对单位产品电耗定额的管理作了介绍，全书共十二章。

在重新修改补充的过程中，经水电部电力生产司汪又雄同志，审阅並做了部分删改，在此表示衷心地感谢。

本书是利用业余时间编写的，由于时间仓促，加之经验和水平所限，书中难免有错误或不妥之处，恳请读者批评指正。

编者：郎东旭

一九八四年五月

目 录

第一章 电力能源合理使用的基本概念

1.1 电力能源的利用	(1)
1.2 电能平衡	(2)
1.3 电能利用率	(2)
1.4 电能平衡的基本方法	(5)
1.5 用电合理化的评价	(5)

第二章 电能利用率测量与计算

2.1 异步电动机电能利用率测量与计算	(8)
2.2 同步电动机电能利用率测量与计算	(13)
2.3 整流设备电能利用率测量与计算	(15)
2.4 热处理电阻炉电能利用率测量与计算	(17)

第三章 提高供电效率减少供电损耗

3.1 线损计算及降低线损的措施	(25)
3.2 变压器损耗计算及降低损耗的措施	(30)

第四章 无功功率与功率因数的改善

4.1 无功功率的基本概念	(39)
4.2 功率因数的计算及其改善	(40)
4.3 电容器的补偿方式	(43)

第五章 电动机节电

5.1 电动机的特性	(47)
5.2 负荷特性	(49)
5.3 节电方法	(53)

第六章 风机节电

6.1 风机的分类与构造	(58)
6.2 风机的性能	(61)
6.3 风机的节电途径及其主要方法	(62)

第七章 水泵节电

7.1 泵的分类与构造	(65)
7.2 泵的性能	(66)

7.3 水泵的节电途径及主要方法	(69)
------------------	--------

第八章 减少传动摩擦损耗

8.1 传动与摩擦的一般概念	(72)
8.2 传动摩擦系统节约电力的途径	(76)
8.3 润滑方式与节约电力	(79)

第九章 电炉设备节电

9.1 电炉设备的分类与构造	(82)
9.2 热处理电阻炉的节电	(86)
9.3 感应熔炼炉的节电	(88)
9.4 电弧炉的节电	(88)

第十章 远红外加热技术的应用

10.1 远红外加热技术的基本概念	(93)
10.2 远红外辐射加热元件的设计与选择	(96)

第十一章 照明设备的节电

11.1 照明设备节电概念	(103)
11.2 照明光源的特性及节电	(103)
11.3 照明设备的节电方法	(108)

第十二章 单位产品电耗定额的管理

12.1 单位产品电耗定额的意义	(110)
12.2 单位产品电耗定额的用电构成及种类	(110)
12.3 电耗定额的种类	(112)
12.4 单位产品电耗定额的制定	(113)
12.5 单位产品电耗定额的应用	(116)

节约用电基础

第一章 电力能源合理使用的基本概念

1.1 电力能源的利用

能源消耗中的电力，一般叫做电力能源，也叫二次能源，它是由一次能源转换来的，由于一次能源短缺而带来的二次能源供应紧张，已经成为发展国民经济的突出问题。由于电力能源的消耗以惊人的速度增长，而电力能源的生产量有限，在过去长期发展中，世界电力总消耗一直保持每十年增加一倍，平均年增长率为7.2%，约为一次能源总消耗平均年增长率的1.5倍。尽管发电能耗不断下降，但是在一次能源总消耗所占的比重，仍与一次能源的增长速度不成比例地逐年增大，因此，电力能源的短缺，是当前世界各国普遍存在的一大问题，引起了各国的极大重视，除了研究开发新能源，节约电力能源，合理使用电力能源也成为一项研究的课题。电力能源用之方便，来之不易，从电能生产到使用的传输路径，要经过几次的变化过程才能送到使用的用户，其中生产电能的发电设备，包括发电机、升压变压器、厂用电及其他设备在输送电能的过程中产生的功率损失约占发电量的6—8%左右，在供电设备中，包括高压送电线路、一次变电所降压变压器、二次变电所及配电线路的功率损失约占总发电量的9—11%左右；而用电设备，其中包括配电变压器及低压线路、低压用电设备（如电动机、电炉、风机、水泵、照明等）产生的功率损失约占发电量的10—13%左右，电能电网的全部输送过程中，总的功率损失大约为25—32%左右，如图1—1所示。

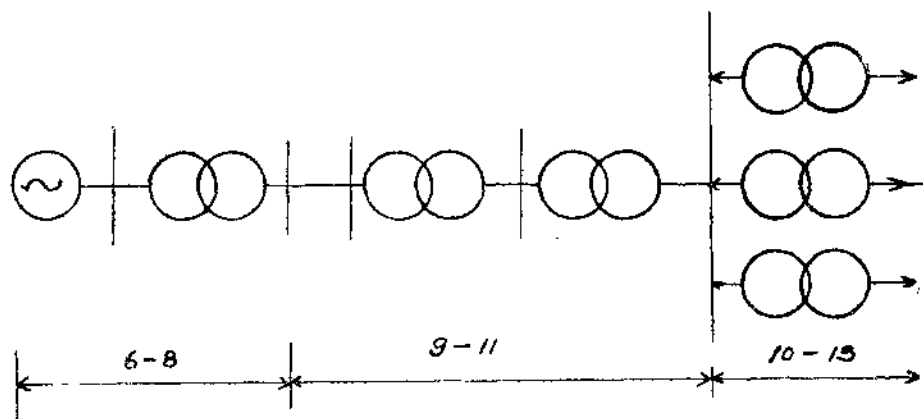


图1—1 电能传送过程的功率损耗

我国电力能源消耗在工业生产方面大约占76—77%，消耗在农业生产方面大约占13—15%，消耗在交通运输事业方面大约占1%，消耗在城乡人民生活方面大约占7—10%左右。

各行各业在使用电能的过程中，不同的用电设备，不同的用电目的，电能消耗也有所不同，通常可分为有效消耗及损耗两种情况，所谓有效消耗，是指电能直接消耗在产品生产的物理的及化学过程中的电量，而电能损耗是生产过程中由于设备性能和生产技术过程的各

种损耗所消耗的电量。因此，，提倡合理使用电力能源，节约电力能源，其主要目的就是尽可能减少电能的损耗，杜绝电能的浪费，提高电能利用率。随着电能供需矛盾日益突出，在发展常规能源的基础上，世界各国把节约能源视为开发“第五能源”。第五能源这一新概念的出現，它说明了物质文明高度发达的国家，已经意识到节约能源的重大经济意义。现在，能源利用率最高的国家是日本、能源利用已经达到总能源消耗量的50%，其次是美国，约为40%。而我国的能源利用率仅达到30%左右。可见开发“第五能源”的潜在“储量”是十分可观的。

因此，发展电能节约技术，改变我国能源利用率低的落后状态，需要从多方面做好工作。

第一，要实行科学管理。尽可能采用先进的管理方法，搞好电气设备的经济运行，消灭有形和无形的电能的损耗，在能量平衡的分析中，要测量和计算电能利用率的情况。

第二，要加强技术改造。目前，我国许多工业部门的工艺技术装备都比较落后，效率低，消耗高，如中小型电动机的效率与国外相比较低3%左右；风机和水泵的效率与国外相差10%左右，变压器单位容量损耗高，与国外同类产品相比，相差一半以上；电加热设备的绝热保温性能差等，因此，有计划有步骤地进行技术改造，研制节能型的新设备，尽量采用效率高、耗能低的先进设备，是节约电能的重要途径。

1、2 电能平衡

电能可以很方便的转变成热能、机械能、光能、化学能等形式，所以，一切能源的开发利用，从一般应用方式来说，都要首先转换成电力之后，再送到各用户去使用，在能源短缺的情况下，合理使用电力能源，搞好工矿企业电能平衡工作，弄清楚电能都消耗在哪里去了，明确节约电能的方面，加强电力能源的科学管理越来越重要了，什么是工矿企业电能平衡，简单地说，就是研究分析一定量的电能在实际使用过程中由一种形式能量转变成另一种形式的能量是多少？这种能量变化有多少为生产和生活所利用，有多少没有被利用而白白地消耗掉了。工矿企业电能平衡是在变电、配电、用电设备电能利用率进行全面测量和计算基础上的综合与分析，它不是反映变、配、用电设备的设计效率，而是反映这些设备的实际使用效率或实际使用时的电能利用率。因此，所反映的不仅是设备的设计效率与选型是否合理，也反映实际使用时是否合理。

工矿企业电能平衡首先要了解清楚电能使用的全部情况，分析电能使用中输入总量有效利用的数量和未被有效利用的数量各占多少？在未被利用的电量中合理的消耗不可避免地消耗和可以减少的电量消耗各为多少？要进行必要的定性和定量分析，由于技术上和管理上不同条件的限制，电能不可能全部利用，总会有一部分不可避免地电能损耗，但是，随着科学技术的不断进步，新设备、新材料、新技术、新工艺将会不断出现，目前认为是不可避免地损耗也可能变成可以避免地损耗。

电能平衡需要把企业的用电收支两个方面的实际情况列表反映出来，收入和支出两个方面都要反映有功功率和无功功率的情况，从而揭示出有效利用和损耗两部分的具体数据和分布情况，将会起到指导改革工艺、改造设备，改进操作，合理使用电力能源的作用。

1、3 电能利用率

电气设备的电能利用率，是设备输出能量与输入能量的比值，如设备输入能量为100，

输出能量为80, 则该设备的电能利用率为80%。电能利用率一词与设备电效率的含义是一致的, 对许多电气设备采用电能利用率一词比采用电效率更为符合实际, 设备电效率一般指在额定状态下电能转换过程能量变化的效率, 如变压器, 输入与输出都是电能, 整流设备输入与输出也是电能, 所不同的是整流设备输入是交流电, 输出是直流电, 这些设备的电效率与电能利用率在含义上是一致的, 又如电热设备, 输入是电能输出是热能, 电能转换成热能的过程中有一部分热量逸散而损失掉了, 仅有一部分热能被利用了, 被利用的这部分能量通常即所谓有效能量, 这类设备的电效率与电能利用率就有不同的含义, 如果用电效率来表达设备的利用情况就不符合实际情况, 不能正确反映电能通过设备后的有效利用情况。而以电能利用率反映电能的利用情况就比较合适。许多电气设备的效率是指设备在额定数值有很大差异, 电能利用率随设备运行状况的变化而变化, 它是随着负荷率, 电源电压, 频率和环境条件的变化而变化的。习惯上表达电能利用率的情况如下式所示:

$$\text{设备电能利用率 } \eta_{\text{电}} = \frac{\text{有效电能}}{\text{总输入电能}} \times 100\%$$

为了真正了解电能利用率情况, 引用并建立电能利用率这一概念是十分必要的, 也是比较确切的。

电能利用率可分为工矿企业总的电能利用率和企业内各项设备实际使用中的电能利用率两种情况。

(1) 总电能利用率

总电能利用率 $\eta_{\text{总}}$, 等于变电、配电、用电设备的电能利用率的乘积, 即,

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{变}} \times \eta_{\text{配}} \times \eta_{\text{用}}$$

所谓总电能利用率 $\eta_{\text{总}}$, 其含义是每输入100千瓦电能其中有效利用电能的百分数。对于多台变配电设备, 其电能利用率应采用加权平均值, 如有3台变压器, 其中甲变压器的负荷 S_1 为250千伏安, 变压器效率、即电能利用率 $\eta_{\text{变甲}} = 0.98$; 乙变压器负荷 S_2 为500千伏安, 电能利用率 $\eta_{\text{变乙}} = 0.97$; 丙变压器负荷 S_3 为800千伏安, 电能利用率 $\eta_{\text{变丙}} = 0.99$, 则总电能利用率 $\eta_{\text{变}}$ 为:

$$\eta_{\text{变}} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{\frac{S_1}{\eta_{\text{变甲}}} + \frac{S_2}{\eta_{\text{变乙}}} + \frac{S_3}{\eta_{\text{变丙}}}} = \frac{250 + 500 + 800}{\frac{250}{0.98} + \frac{500}{0.97} + \frac{800}{0.99}} = 0.982$$

如图1—2所示, 方块内的数字为电能利用率, 线条上标记的数字为输入电能, 试求出各部分的电能利用率。

总有效电能 $P_{\text{总}} = 504 + 611 + 1693.4 + 92.1 \approx 2900.5$ 千瓦

总输入电能 $P_{\text{总入}} = 5000$ 千瓦

总电能利用率及变电、配电和用电设备的电能利用率分别为:

$$\eta_{\text{总}} = \frac{2900.5}{5000} = 0.58$$

$$\eta_{\text{变}} = \frac{3920 + 970}{4000 + 1000} = 0.978$$

$$\eta_{\text{配}} = \frac{1940 + 1881.6 + 921.5}{2000 + 1920 + 970} = 0.969$$

$$\eta_{\text{用}} = \frac{504 + 611 + 1693.4 + 92.1}{1000 + 940 + 1881.6 + 921.5} = 0.61$$

$$\eta_{\text{总}} = 0.978 \times 0.969 \times 0.61 = 0.58$$

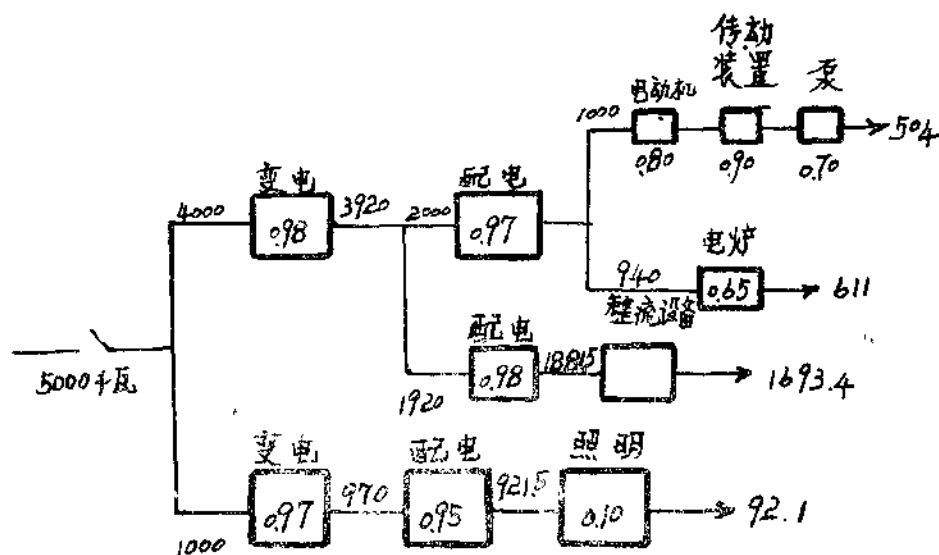


图 1—2

(2) 工矿企业内设备使用时的实际电能利用率

考核工矿企业设备使用时的实际电能利用率，应该包括向设备供电的设备的电能利用率，这样进行考核电能利用率可以反映企业输入的电能通过各种设备后真正的利用率情况是多少，如果以图 1—2 为例，计算出的用电点电能利用率如图 1—3 中方块外的数字。

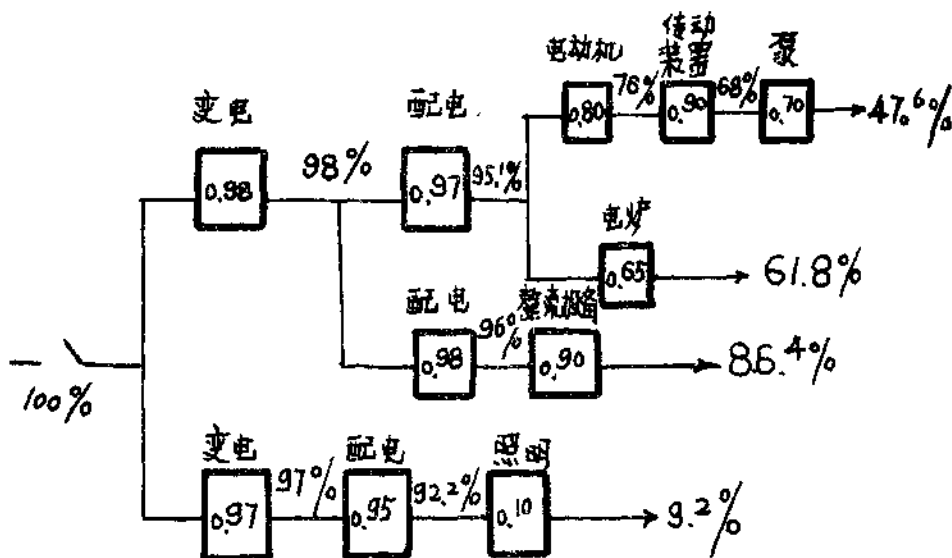


图 1—3

从图 1—3 看出泵的电能为 70%，而在工矿企业中的实际电能利用率仅为 47.6%；电炉本身的电能利用率为 65%，在企业中实际电能利用率为 61.8%；整流设备本身的电能利用率为 90%，在使用中实际电能利用率为 86.4%；照明本身的电能利用率为 10%；实际电

能利用率为9.2%。应当指出：进行电能平衡，不仅要计算设备的有功电能利用率也应平衡无功电能的消耗，最经济的办法就是就地平衡无功消耗，因为无功电能消耗，将导致有功电能损耗的增加，降低设备的电能利用率，所以，必须同时平衡无功电能消耗，提高功率因数。

上述考核电能利用率的方法，在实际工作中可能比较复杂也比较麻烦，也可以分别对各项设备实行单独考核电能利用率。

1、4 电能平衡的基本方法

电能平衡需要通过一定的测量和计算才能了解电能的使用情况，在测量和计算的基础上，再通过画图和列表采用收支平衡法算出所有的收入和支出的各个项目，按照电能的传递路径和各项设备的电能利用率逐步计算，分析或者按工艺流程一步一步进行计算，分析电能利用率，最后完成一个完整的电能平衡系统。

电能平衡的测量和计算，事先要确定测量点，安装必要的测量仪表，按照预定的测量方法进行测试，并且将测量的结果进行整理计算，如果统计资料比较齐全，也可以利用统计资料进行计算。测量和计算企业电能平衡和电能利用率，在时间的选择上，应选取有代表性的正常负荷、高峰负荷、平均负荷时等几种不同情况的电能利用率情况，以千瓦为单位进行计算。在选取各类负荷有困难的，也可选取某一段时间的累积电量消耗情况，如正常工作日，正常工作月的电量消耗情况，以度为单位进行计算。

在测量和计算电能平衡的工作中，由于设备条件、工艺、生产目的等的不同，电能损耗这一概念在各行各业中并不完全一致，如热处理行业将电能变成热能，使被加热的金属，升温到一定的温度，要带走一定的热量，这部分热量实际上是电能，这是生产所必需的能量，不能认为是能量损耗，只有这类设备中的散热损耗那部分的能量才应认为是能量损耗。因此，研究分析电能消耗的有效部分和损耗部分应掌握的一个基本原则是：生产工艺所必需消耗的能量应认为是有效消耗，除此之外则认为是损耗部分。因此，在测量之前，必须对工艺过程的电能消耗情况进行详细的分析，当然，随着科学技术的不断进步，生产工艺过程的不断革新，过去认为是必需的能量消耗，也可能变不必需的能量消耗。不过，我们应当明确测量、计算、分析电能平衡工作是一科学管理电能使用情况的新工作，对于促进合理使用电力能源是大有好处的。通过开展电能平衡，测量和计算电能利用率，可以发现电能使用过程中存在的不合理现象和浪费用电的问题，从而可以寻找合理使用电力能源的途径，提高利用率。应当特别提出的是电能平衡必须是能量平衡而不是功率平衡，虽然对某些设备的电能利用率采用输入功率与输出功率的方法求得其电能利用率，但是进行企业电能平衡时，需要采用电能消耗数量（即电度千瓦时）来分析电能的使用情况。

1、5 用电合理化的评价

用电合理化就是适应能源的需求情况，使每度电能都能充分发挥最大的经济效益，电能从发电厂到线路末端的用户都应高效率地使用，减少损耗和浪费。所以用电合理化的基本内容就是节约用电。从节电观点出发，用电合理化必须做到以下几点：

- 1) 改进机器设备的运行方式；
- 2) 采用高效率设备；
- 3) 靠安全生产和维护设备达到提高产量；

4) 进行普遍的节电教育。

我国电力来源的基本情况如表 1—1 所示,

表 1—1 我国发电能源的构成

年 份	发 电 能 源 构 成 (%)			
	水 电	煤 电	油 电	核 电
1980	19.4	59.4	21.2	—
1981	21.2	58.7	20.1	—
1982	22.7	59	18.3	—

从表 1—1 可知, 电能的来源是以火力发电为主, 因此, 节电就是节煤、节油、节水。电能广泛消耗在各种用电设备中, 做好各种用电设备的维护管理, 提高操作技术水平, 是合理用电的重要保证之一。提倡用电合理化的目标就是消耗较少的电能, 生产或完成更多的产量任务, 这就需要加强用电管理工作, 推行用电合理化, 应重点做好以下各项工作。

1. 电力管理

电力管理最基本的工作就是要正确地掌握用电状况, 并以用电状况所掌握的各种运行参数及测定的数据为基础, 进行分析比较, 研究使用电能的过程中操作工序的变化情况, 最大负荷情况, 每天及每月的用电量的情况, 产品电耗情况及升降的原因, 用电功率因数及无功

表 1—2 电气设备运行管理的基本项目

装 置	测 量	应 考 虑 的 项 目
变 压 器	最 大 负 荷	是并联运行还是单独运行, 与其它变压器的负荷分配; 变压器的功率因数。
	全 日 负 荷	轻负荷时断开停用变压器的容量
	电 压	各负荷的电压状况
主 回 路	电 流	线路损耗, 线路的功率因数。
	电 压	线路损耗, 导线截面; 变压器分接头。
电 动 机	电 流	容量是否合适
	电 压	效率, 转矩。
照 明	照 度	利用天然光, 照明器具的清扫; 光源的选择。
	电 压	光通量, 寿命

补偿设备的运行情况, 生产效率, 设备效率以及电能利用率情况。

2. 设备管理

以做好节电为着眼点的设备管理工作, 应随时掌握以下各项情况:

- (1) 受电配电设备的负荷情况及利用率情况。
- (2) 各种生产装置及用电设备实际负荷情况。
- (3) 为保证安全生产而进行的设备维护检修情况。

电气设备管理的主要项目, 要使电气设备高效率运行, 应考虑的主要项目, 可参照表 1—2 所列的内容。

生产设备管理, 要使生产设备高效率运行, 最重要的是安装符合使用目的和符合使用条件的装置, 合适的容量, 能够防止设备性能的变劣保持正常运行状况, 为此, 在使用过程中, 应经常注意考虑的内容如表 1—3 所示。

表 1—3 生产设备运行管理的基本项目

项 目	应 考 虑 的 项 目
连 接	偏心, 皮带的松紧程度; 高效率的连接方法。
泵	调整扬程及容量, 管子的口径, 简化线路; 负荷变化时采取的措施
风 机	调整风压及风量, 负荷变化时采取的措施
压 缩 机	数台压缩机共同工作时的运行方式, 使用压力的调整; 轻载时的启动方式; 防止漏气
电 焊 机	改善功率因数, 导线的长度; 不焊接断开变压器; 能否自动焊接
电 炉	热损耗的途径, 开工率
电 解	电流效率, 二次漏抗、接触电阻

对于电力管理和设备管理的基本项目, 都应结合本企业的具体情况制定考核评价的标准, 并以此作为节电管理的基本依据, 推动合理用电, 节约用电取得更大的效果。

第二章 电能利用率的测量与计算

2、1 异步电动机电能利用率测量与计算

一、基本参数的确定

异步电动机基本电气参数直接影响着电动机的运行性能。因此，对于运行中的电动机的电气参数及时掌握是极为重要的。电动机产品目录中给出的技术数据是在额定负荷状况下的数据，如额定功率 P_e ，额定电压 U_e ，定子额定电流 I_{1e} ，额定功率因数 $\cos\varphi_e$ ，额定效率 η_e ，额定转速 n_e 。绕线式异步电动机还应给出转子额定电压 U_{2e} ，转子额定电流 I_{2e} 。对于鼠笼型电动机要给出起动电流倍数 $i_Q = \frac{I_Q}{I_{1e}}$ ，起动转矩与额定转矩的比值 $\lambda_Q = \frac{M_Q}{M_e}$ ，过载系数

$\lambda_{\max} = \frac{M_{\max}}{M_e}$ 等。使用中的电动机，常常由于使用条件的不同，以及所拖动机械设备的不同，电动机电能利用率随着负荷的变化而变化，为了合理使用电力能源，需要了解电动机在使用过程中的实际电能利用率，也就是电动机的实际使用效率。

1. 异步电动机的空载电流

额定电压下的空载电流 I_{0e} 可根据下式求出：

$$I_{0e} = I_e \left(\sin\varphi_e - \frac{\cos\varphi_e}{\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 + 1}} \right) \\ \approx I_e \left(\sin\varphi_e - \frac{\cos\varphi_e}{2\lambda_{\max}} \right) \quad (\text{安}) \quad (2-1)$$

式中 $\sin\varphi_e$ 是根据技术数据给出额定功率因数得出的，即：

$$\sin\varphi_e = \sqrt{1 - \cos^2\varphi_e}$$

2. 额定力矩

电动机的额定力矩是根据输出功率求出的，计算公式如下：

$$M_e = \frac{975 (P_e + \Delta P_j)}{n_t (1 - S_e)} \quad (\text{公斤} \cdot \text{米}) \quad (2-2)$$

式中 ΔP_j ——电动机的机械损耗，通常取 $0.01P_e$ ；

n_t ——异步电动机的同步转速（转/分）；

975——千瓦与每分转数等值换算成公斤——米的换算系数。

3. 在不同负荷下的转差率

额定转差率为

$$S_e = \frac{n_t - n_e}{n_t} 100\% \quad (2-3)$$

临界转差率为（ $SLJZ$ ）为

$$SLJZ = S_e (\lambda_{\max} + \sqrt{\lambda_{\max}^2 - 1}) \quad (2-4)$$

可近似地按下式求得：

$$SLJZ = S_e (2\lambda_{\max})$$

当电动机担任一负荷时转差率为:

$$S = S_{LJZ} \left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda} - \sqrt{\left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right)^2 - 1} \right)$$

$$= \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right)^2 - 1} \quad (2-5)$$

式中 λ ——电动机担任任意负荷时转矩与额定转矩的比值, 即:

$$\lambda = \frac{M}{M_e} \quad (2-6)$$

4. 定子及转子电阻的计算

根据电动机等值电路图可得出转子电阻折算到定子上的值为:

$$R_2' = \frac{10^3 S_e (P_e + \Delta P)}{3 I_2'^2 (1 - S_e)} \quad (\text{欧}) \quad (2-7)$$

式中 $I_2 e'$ ——转子额定电流折算到定子上的值为:

$$I_2 e' = I_2 e \frac{u_2 e}{E_1} \approx I_2 e \frac{C_1 u_2}{u_e} \quad (\text{安}) \quad (2-8)$$

根据转子阻抗折算为

$$R_2' = R_2 \left(\frac{u_e}{C_1 u_2 e} \right)^2 \quad (\text{欧}) \quad (2-9)$$

$$R_2 = R_2' \left(\frac{C_1 u_2 e}{u_e} \right)^2 \quad (\text{欧}) \quad (2-10)$$

式中 C_1 ——是由T型等值电路化为Γ型等值电路的修正系数。

$$\text{通常 } C_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_0} \approx 1.03$$

Z_1 ——电动机定子阻抗;

Z_0 ——电动机激磁阻抗。

电动机定子电阻值一般可取 $R_1 = C_1 R_2'$, 所以, 计算出转子电阻后可求出定子电阻。

5. 定子与转子电抗的计算

按照电动机Γ型等值电路便可求出定子与转子漏电抗 X_k 值为:

$$X = C_1 \sqrt{\left(\frac{C_1 R_2' \operatorname{tg} \varphi_{2e}}{S_e} \right)^2 - R_1^2} \quad (2-11)$$

式中 $\operatorname{tg} \varphi_{2e}$ ——为额定转速时转子电流与电压 u_e 之间相位角的正切。

$$\operatorname{tg} \varphi_{2e} \approx \frac{S_e}{S_{LJZ}} \quad (2-12)$$

二、测量与计算

1. 电动机的能量流图

异步电动机的能量关系可用流图的方式来表示, 如图 2-1 所示, 这种流图叫做能量流图。

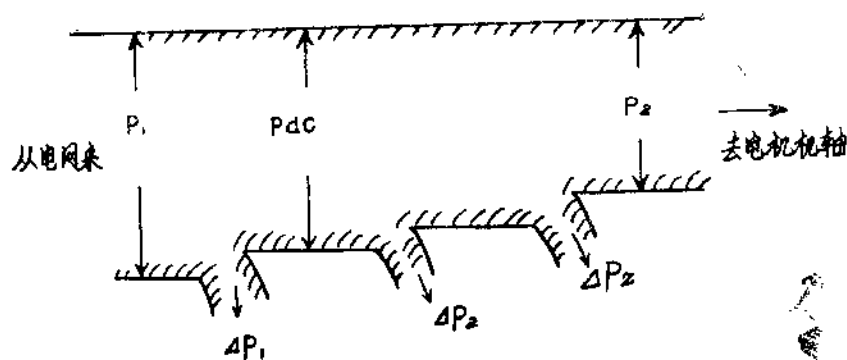


图 2—1

其能量流图的关系，如异步电动机从电网取得的能量若以功率形式表示为 P_1 叫输入功率。

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi$$

当电动机带负荷后，定子绕组中将产生铜损耗 ΔP_1 ：

$$\Delta P_1 = 3 I_1^2 R_1$$

电动机的磁场变化，在转子及定子铁芯中所引起的铁芯损耗 ΔP_t 。

电动机输入功率去掉铁芯损耗与定子铜损，将以电磁方式传递给转子，这部分功率叫电磁功率 P_{dc} 。

$$P_{dc} = P_1 - (\Delta P_1 + \Delta P_t) \quad (2-13)$$

电机转子得到电磁功率后，将有电流 I_2 流过，故在转子绕组中产生热损耗，即转子铜损耗 ΔP_2 。

电动机拖动机械设备进行生产，转子转动将会遇到空气阻力、轴承摩擦阻力，这部分阻力所消耗的功率叫机械损耗 ΔP_j 。

由于电动机端部磁场变化在端部外壳中引起的损耗，以及高次谐波在铁心中引起的损耗统称为附加损耗或叫杂散损耗 ΔP_z 。

电动机转子从定子接受到的电磁功率，去掉转子铜损与机械损耗，和杂散损耗之后，全部送出交给机械，亦即电动机的输出功率 P_2 。

$$P_2 = P_{dc} - (\Delta P_2 + \Delta P_j + \Delta P_z) \quad (2-14)$$

$$= P_1 - (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_t + \Delta P_j + \Delta P_z)$$

2. 电动机的效率测量与计算

(1) 直接测量法

如果在现场具有直接测量效率的条件，有相当容量的测功机械或相同容量的直流发电机，可以用功率表直接测量输入功率 P_1 ，输出功率 P_2 ，并根据下式计算

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{M n b}{975} - \Delta P_1 \\ &= \frac{M n b}{975} \left(1 - S \frac{K + t b}{K + t} \right) - 3 I_1^2 (R_1 b + R_1 t) 10^{-3} \text{ (千瓦)} \end{aligned} \quad (2-15)$$

式中 M ——测出的电动机轴力矩（输出力矩）（公斤·米）

n ——电动机在输出力矩为 M 时转子温度换算至基准工作温度下的转速（转/分）；

ΔP_1 ——定子绕组温度换算至基准温度时定子铜损耗（千瓦）；

n_1 ——电动机同步转速，（转/分）；

S ——对应于力矩 M 的转差率；

t_b ——基准工作温度（℃）；

t ——试验时转子实测温度值；

K ——常数，铜取235℃，铝取228℃；

I_1 ——定子相电流，（安）；

R_{1b} ——基准工作温度下定子绕组的相电阻，（欧）；

R_{1t} ——试验时定子绕组热态相电阻，（欧）；

根据测得的输入功率 P_1 与输出功率 P_2 的值，便可计算出电机的效率为：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (2-16)$$

此值亦即电动机的电能利用率。

（2）间接测量法

效率（或电能利用率）的间接测量法，也叫做损耗分析法，在现场进行测量是被广泛应用的，不需要特殊的测量设备，只是需要电压表、电流表、功率表、功率因数表等测量用仪表，进行测量电动机的效率时，需要对电动机在一定输入功率 P_1 时的各项损耗进行测量，测出输出功率 P_2 由 P_1 减去总的损耗 $\Sigma \Delta P$ ，按下式计算出电动机的效率：

$$P_2 = P_1 - \Sigma \Delta P$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1}\right) \times 100\% \quad (2-17)$$

上述的各项损耗，可通过空载试验和短路试验来测得。

1）空载试验

电动机空载试验是对定子绕组施加额定电压额定频率，使电动机轴上在不带负荷的空载状态下运转，空载试验主要是测量空载电流 I ，空载损耗 ΔP 。及空载状态下的转速 n_0 ，功率因数 $\cos \varphi_0$ 等。

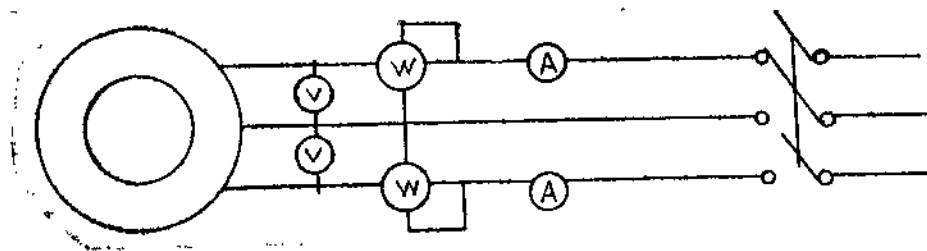


图 2—2

由于电动机在空载状态下运转，其输出功率 P_2 为零，而转速接近于同步转速，转子电流极小。定子电流仅为空载电流。

空载时电动机的电流主要是励磁电流，它的大小决定于气隙磁势的大小。一般异步电动机空载电流约在30~50%电动机的额定电流。电流的相位几乎滞后于电压90%，空载功率因

数一般小于0.2以下。

电动机气隙磁通的大小是由外施电压的高低来决定的，磁路的饱和程度决定于外施电压的大小。当外施电压较低时，磁路不饱和，空载电流较小，当电压增高时，特别是电压高于额定电压时，电动机的磁路更加饱和，空载电流会随着电压的增高而急剧增高。

对于绕线式异步电动机作空载试验时，应该将全部附加电阻短接，将转子绕组短路在集电环上。在测量 $P_o = f(u)$ 曲线时，施加于定子绕组的电压，应该从110~130%额定电压开始，逐步降低到可能达到的最低电压为止（即电流开始回升为止）。在测量范围内，同时测取各相的电压、电流、功率等数据，一般选择7~9个测点，最后进行分解各种损耗。

空载损耗包括定子铜损 ΔP_{ot1} ，铁损 ΔP_{ti} ，机械损耗 ΔP_j ，即：

$$P_o = \Delta P_{ot1} + \Delta P_{ti} + \Delta P_j \quad (2-18)$$

定子铜损 $\Delta P_{ot1} = 3I_1^2 R_{1w}$ 铁损与机械损耗为： $\Delta P_{ti} + \Delta P_j = P_o - 3I_1^2 R_{1w}$

式中 R_{1w} ——换算到标准温度下的电阻值。

铁损与电动机的电压大小有关，几乎与电压的平方成正比，故当 $u_1 = 0$ 时，没有铁损，而机械损耗与电机转速大小有关，空载试验时，转速 n 没有变化，机械损耗可视为常数。

2) 短路试验

电动机作短路试验是将转子堵住不使其转动的条件下进行，给定子绕组施加以额定频率的三相平衡电压，通以电动机额定电流1.4~1.7倍（100千瓦以下电动机），1.1~1.5倍（100千瓦以上的电动机）的短路电流，量取短路电流、电压、功率及力矩等物理量。一般作短路试验时，短路电压常按表2-1给出的电压值。

表 2-1 短路试验电压表

额定电压 (伏)	220	380	660	3000	6000
短路电压 (伏)	60	100	170	800	1400

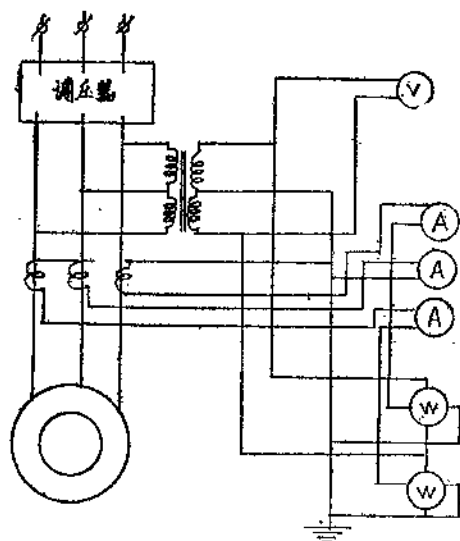


图 2-3 短路试验接线图

2、2 同步电动机电能利用率测量与计算

一、同步电动机各项损耗的测量

同步电动机的测量方法和异步电动机基本相同。所以有区别的是同步电动机有励磁机的损耗。因为励磁机的损耗是从线路上取得的能量，应该计入输入功率内，同步电动机的转子不计损耗，只计算励磁损耗。

1. 同步电动机的损耗

同步电动机的损耗包括下列各项内容：

- 1) 铁损 ΔP_{ti}
- 2) 机械损耗 ΔP_j
- 3) 定子绕组的铜损 ΔP_1
- 4) 杂散损耗 ΔP_z
- 5) 励磁机损耗的 ΔP_e

2. 各项损耗的确定

1) 铁损耗 ΔP_{ti} 和机械损耗 ΔP_j 之和应使同步电机在额定频率下空载运行，调节励磁机电流使定子绕组中的输入电流为最小值时，测量同步机的输入功率并计算出：

$$\Delta P_{ti} + \Delta P_j = P_o - 3I_o^2 R_w \quad (\text{千瓦}) \quad (2-19)$$

式中 ΔP_{ti} ——同步电动机的铁损，千瓦；

ΔP_j ——同步电动机的机械损耗，千瓦；

P_o ——同步电动机的空载功率，千瓦；

I_o ——同步电动机的空载电流，安；

R_w ——基准温度时的定子相电阻，（欧）。

为了计算方便，把铁损 ΔP_{ti} 和机械损耗 ΔP_j 之和，称之为固定损耗表示如下：

$$\Delta P_e = \Delta P_{ti} + \Delta P_j \quad (\text{千瓦}) \quad (2-20)$$

如果同步电动机是由附设的励磁机供给励磁，在空载输入功率中除去空载电枢电阻损耗外，还要减去励磁线路中的基本铜耗及励磁机的铁损和铜耗，而附设的励磁机的机械损耗应并入被测同步电动机的机械损耗之内。

2) 定子绕组的铜耗

$$\Delta P_1 = 3I_1^2 R' \times 10^{-3} \quad (\text{千瓦}) \quad (2-21)$$

式中 I_1 ——带负荷时的相电流，

3) 励磁损耗 ΔP_e 当同步电动机直接由外界直流励磁时，可按下列式求得：

$$\Delta P_{eo} = I_e^2 R_e \times 10^{-3} \quad (\text{千瓦}) \quad (2-22)$$

式中 ΔP_{eo} ——励磁电耗，（千瓦）；

I_e ——励磁电流，安；

R_e ——标准工作温度（75°）时励磁绕组的直流电阻值，（欧）。

若励磁电流是滑环电刷引入，则励磁损耗应包括电刷电能损耗，可由给定负荷时的励磁电流与电刷接触电压降乘积算出。一般电刷电压降可按每极性“碳精石墨”为1伏，“金属石墨”为0.3伏计算。外电源励磁时，外电源中的损耗不计入在内。