

电业工人
学习文选

22



徐 承 凱編著

提高力率的方法

水利电力出版社

提高功率的方法

徐承 熊耀青

11003319

水利电力出版社出版 (北京前门大街22号)

北京市书刊出版业营业登记证出字第001号

水利电力出版社印刷厂排印 新华书店发行

787×1092 $\frac{1}{2}$ 开本 1 $\frac{1}{2}$ 印张 21千字

1958年3月北京第1版

1958年3月北京第1次印刷(0001—1100)

统一书号: T15143·413 定价(第1次)0.41元

目 錄

第一章 力率的基本概念	2
第二章 为什么要提高力率	5
一、提高力率对电力系统的关系	6
二、提高力率对企业用户的关系	11
第三章 造成力率低的原因是什么	13
第四章 提高力率的方法	19
一、自然提高力率的方法	20
二、人工补偿装置提高力率的方法	33
三、静电电容器的構造、安裝和保护的特点及要求	39

第一章 功率的基本概念

在直流电路里，电压和电流是一致不变的。根据欧姆定律可以确定电阻（ R ）、电压（ U ）、电流（ I ）以及功率之间的关系：

$$I = \frac{U}{R} (\text{安}); \quad U = IR (\text{伏});$$

$$P = UI = I^2 R (\text{瓦})。$$

如果同样的电路通以交流电源时，虽然欧姆定律仍然适用，但此时电流及电压均同时随着时间而变化（图1），同时出现它们的最大值和最小值。由于起始的相位都等于零，所以可以认为电流和电压是同相的，在任何瞬间内功率数值仍为电压及电流的乘积。在日常生活中电灯、电热就属于纯电阻负荷的交流电路。

但是很多用电设备（如电动机、变压器等），它们的构造通常是经过一种加工绕制过的铁心和线

卷。在这种情况下，由交流电流所产生的穿链线卷的磁通也是交变的，而且所感应出来的自感电势具有反作用的性质，阻碍着随时间而变化的电流通过，所以它具有电感的特性，

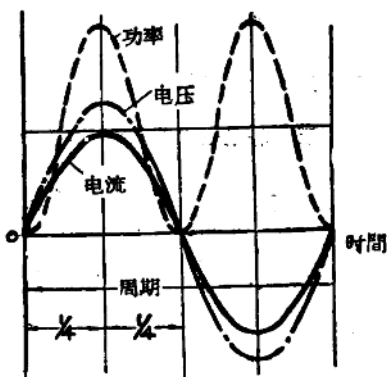


图1 在电阻电路中电流、电压及功率的变化曲线

但是线卷本身还具有电阻，它的数值也未必来得比感抗(x)小，这种带有电阻和电感的电路，根据欧姆定律所得出的电压与电流的比值称作为阻抗（用符号 Z 来表示）。阻抗、感抗和电阻间的关系以用直角三角形来表示（图2），若用公式表示：

$$Z = \sqrt{R^2 + x^2} \text{ (欧)},$$

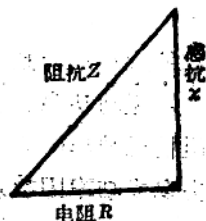


图2 阻抗三角形

不论从三角形或从公式中都可以看出，阻抗值永远比单纯的电阻或感抗大，所以对于外施电源电压来说要克服电路中比电阻大的阻抗值，势必将电流的增長（或消迟）延迟一个时限阶段，这样电流和电压随时间而变化的关系既不可能象电阻电路那样的保持同相，又不可能象电感电路那样电流滞后于电压 90° ，而却出现着所谓相位差（图3），相位差的大小决定于电路中电阻及电感的比例关系。

由图3中可以看出，由于相位差的出现，在一个周期的时间内，有一部分电压和电流的方向是相反，有一部分是相同的。根据电路输出的功率永远等于电流与电压相乘积的概念，可以看出由于相位差的出现将使电压

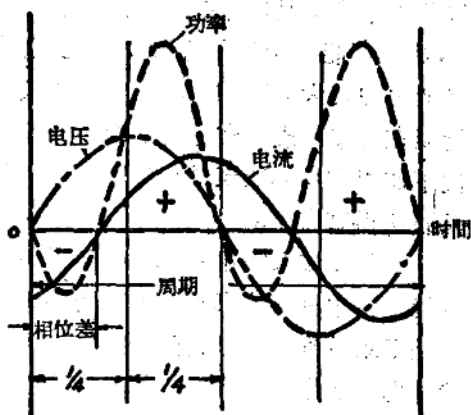


图3 在具有电阻及电感电路中电流、电压及功率的变化曲线

和电流方向相反的那一部分功率不可能把电能变换成机械能，完全消耗于建立交流磁场而不能做功，所以这部分功率可以称为无功功率（用符号 Q 来表示），单位是乏尔（或千乏尔）。因此可以明白，相位差的大小不但决定着无功功率的大小，而且也决定着实际有功功率减少的数值。

无功功率、有功功率和相位差角的关系是这样的，它与阻抗三角形的关系完全相同，如果把相位角 φ 的余弦称为力率或功率因数，那么有功功率的公式可写成：

$$P = UI \cos \varphi \text{ (瓦)},$$

发电机及变压器等电气设备的铭牌通常用视在功率 (S) 来表示，单位是千伏安。千伏安与千瓦的关系可用功率三角形（图 4）来表示：

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \text{或} \quad \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}.$$

现在可以很明显地看出，仅当力率等于 1（或无功功率等于零时）有功功率 P 才可能等于视在功率 S ，此时设备的出力最大。要使有功功率等于或接近视在功率，或者在有功功率不变的情况下使视在功率减至最小的唯一办法就是设法提高力率。

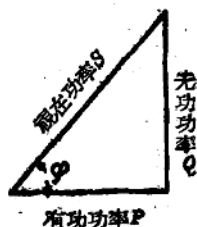


图 4 功率三角形

改善交流电路中的相位差和提高力率的主要办法是减小电气设备中电感的影响。但是完全要自然地消灭这种影响，那是很难做到的，因此有时为了保证力率提高到规定的数值，就得选用适当的电容器或与电容器有相类似特性的装置和具有电感的负载并联，使得在原来具有电感的电路中用作于建立磁场所消耗的能量却被变换为储藏在电容器电场中的能

量，但电容器并不消耗大量的能量，所以当具有电感的电路需要能量时又被返送回去，这样能量的互换并不与电源发生关系，电力系统就可以把原来需要供给用户电感负载（电动机、变压器等）用来建立交流磁场的一部分能量节省出来，而且也能把所节省的这一部分能量在输送过程中消耗的功率变为实际可以利用的有功功率，提高了发电及送变电设备的出力。这就是补偿相位角、提高力率的概念和它直接所得到的效益，图 5 列出了提高力率后电路中实际合成电流与电压的变化曲线，该图与图 1 相类似，即电路有功功率与视在功率相等（力率等于 1）。

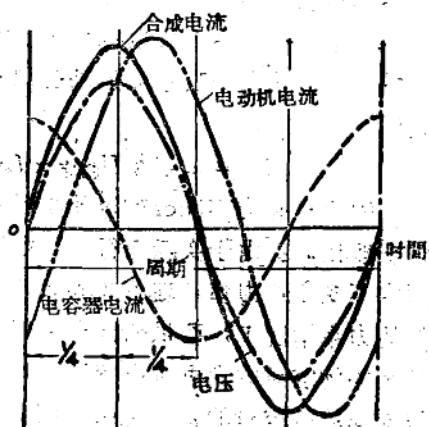


图 5 具有电阻及电感电路中采用电容补偿后实际合成电流与电压间的变化曲线（在力率等于 1 的情况下）

有关提高力率的具体方法将下面专门详细讨论。

第二章 为什么要提高力率

电压与电流间相位差的出现是不令人欢迎的，要消除这种现象就必须提高力率。那么提高力率到底有些什么好处呢？在讨论这问题时可将它的利害关系分成二方面来分析。

一、提高力率对电力系统的关系

1. 提高力率可以增加发电机的输出功率、变压器及输电线路的负载能力

在电力系统中，发电机和变压器等电气设备的铭牌容量通常是用仟伏安来表示。但是三相交流电路中功率的方程式是：

$$P_{\text{额定}} = \sqrt{3} U_{\text{额定}} \times I_{\text{额定}} \times \cos\varphi \text{ 仟瓦,}$$

因此只有力率($\cos\varphi$)等于1时，功率的仟瓦数才与仟伏安数相同。由于实际运行中，电压的变动较小（可以当作额定不变），力率却随着外界负荷而变化，这就是说，在较低的力率情况下，要供给同样负载的有功功率就必须装备有较大铭牌容量的发电机或变压器，或者说，在力率较低时，以同样铭牌容量的发电机和变压器所能供给的负载有功功率就要减少，设备的利用率就因此而得不到提高。

例如某热电站，设有额定容量为15,000仟伏安，额定力率为0.8的汽轮发电机两台，这样每台发电机的最大输出功率可达到 $15,000 \times 0.8 = 12,000$ 仟瓦，两台共计24,000仟瓦。但实际运行中的力率仅有0.6；此时两台发电机的总输出功率将为 $2 \times 15,000 \times 0.6 = 18,000$ 仟瓦。因此可以看出，相同容量的发电机，力率的不同就影响了它的实际出力，本例中每台发电机就有3,000仟瓦的功率消耗于建立交流磁场而未被充分利用。如果我们不设法将力率提高至发电机的额定力率值而却要增加负载功率至24,000仟瓦，那么发电机就过负荷了，这样不但对发电机的绕组绝缘和散热条件不利，而且也会影响它的使用寿命甚至会引起事故。

又例如某变电所，设有35/10仟伏、15,000仟伏安降压

变压器兩台，对附近的工厂区供电，原来选择变压器容量时是按該地区最大負荷为 18,000 仟瓦，平均力率为 0.75 考虑的，后来各工厂普遍展开节约用电和提高力率的措施后，使該变电所的平均力率提高至 0.85，讓我們来分析一下它的經济效果。

按 $P = S \times \cos\varphi$ 的公式可以求得 当 $P = 18,000$ 仟瓦， $\cos\varphi = 0.75$ 时 該 变 电 所 的 实 际 視 在 負 荷 等 于 $\frac{18,000}{0.75} = 24,000$ 仟伏安，而变压器的負荷率等于 $24,000/30,000 = 0.8$ 。如果力率提高至 0.85，而仍維持变压器的負荷率不变，那么变电所的实际負荷能力將为 $24,000 \times 0.85 = 20,400$ 仟瓦。因此可以看出，該变电所的力率提高 10% 以后，就可以挖掘出 2,400 仟瓦的设备潛力，同时也說明了該变电所在不改变变压器的运行条件和不增添设备的情况下，可以扩大对新企业用戶供电。

对輸电綫路來說，力率的提高，无功功率及实际負荷电流均將减小，这样可以在不改变原来导綫截面的情况下提高了輸送容量，換句話說，力率的过分降低要輸送同样的有功功率就必定会增加綫路电流，因此得加粗导綫截面。

2. 提高力率可以降低电力系统各部分(主要是輸电綫路)的功率損耗

从基本公式 $I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi}$ 中可以看出，負荷电流是与力率成反比的，因为功率損耗是与电流的平方成正比，所以就可以理解成力率的降低使負荷电流增加，当然綫路的功率損耗也随着加大了。

例如某 35 仟伏輸电綫路，綫路电阻为 2.1 欧，电抗为

3.2欧，在正常运行情况下的最大輸送功率为8,000仟瓦，当力率为0.7时，綫路最大負荷电流是：

$$I_1 = \frac{8,000}{\sqrt{3} \times 35 \times 0.7} = 189 \text{ 安};$$

若綫路最大損耗年利用小时数^①取为4,000小时，則該綫路的年电能損耗等于：

$$\begin{aligned} \Delta W_1 &= 3I_1^2 \times R \times T / 1,000 = \frac{3 \times 189^2 \times 2.1 \times 4,000}{1,000} \\ &= 899,600 \text{ 仟瓦小时/年}; \end{aligned}$$

現將綫路的力率提高至0.85，且不考慮由于力率提高后最大損耗年利用小时实际可以降低的这个因素，那么綫路的負荷电流將为：

$$I_2 = \frac{8,000}{\sqrt{3} \times 35 \times 0.85} = 155 \text{ 安};$$

$$\begin{aligned} \text{綫路的年电能損耗等于: } \Delta W_2 &= \frac{3 \times I_2^2 \times R \times T}{1,000} \\ &= \frac{3 \times 155^2 \times 2.1 \times 4,000}{1,000} = 600,500 \text{ 仟瓦小时/年}, \end{aligned}$$

由于綫路力率提高15%后，所减少的年电能損耗等于：

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta W_1 - \Delta W_2 = 899,600 - 600,500 \\ &= 299,100 \text{ 仟瓦小时/年}. \end{aligned}$$

3. 提高力率可以减少电力系统中的电压損失，改善电气设备的运行条件

力率的高低，从发电厂至用户（城市、工厂）的远距离綫路輸送中的电压下降程度也可以切实地反映出来，这是由

① 最大損耗年利用小时数一般可以根据負荷图表中最大負荷利用小时与力率的关系求得。

于一部分电压被用来克服线路中的阻抗所引起的，二相线路中电压损失的基本公式是：

$$\Delta u = \frac{PR \times 10^{-3} + Qx \times 10^{-3}}{u} = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + x \sin \varphi)$$

关于式中所列的符号在前一章中都已介绍过了。若用电压损失的百分比表示也可写成： $\Delta u \% = \frac{PR + Qx}{1,000 u^2}$ 。

从公式中可以看出，在线路截面固定的情况下（即 R 及 x 值不变）电压损失除了与负载的有功功率大小有关外（这里也假定是已知的），也与负载无功功率和力率大小有关。如果力率高，那么从发电厂与变电所送出来的电力往往是符合标准的（即电压保持额定值），而达到用户处也不低于标准，如果力率过低，输送至用户处的电压难免会发生低于标准甚多，会引起用户的不满。如果电力系统单纯地从提高输出端的电压来满足远处用户的需要，则又会使近处用户的电压太高。例如某电业局所属的一个区域变电所，规模较大，6 千伏配电线路的输送距离也较远，由于该地区用户的力率调整还不够理想，而只能采用提高变压器输出端电压的措施来满足远处用户的要求（变压器二次侧无自动电压调整装置），使该变电所母线电压的变动范围经常在 6,300 伏（满负荷）至 6,900 伏间（轻负荷）甚至更高，造成邻近该变电所的一些工厂经常发生电灯泡烧毁（用不到二周就需更换），电动机发热，甚至对已安装好的静电电容器组由于电压过高而不敢长期投入运行等现象的产生。当然电压损失过多和波动范围过大的原因很多，但是保证电压的质量，从提高力率的观点着手解决也是非常重要的。

我們再从前例中知道线路电阻 $R=2.1$ 欧，电抗 $x=3.2$

歐，以及力率為 0.7 時的負荷電流等於 189 安，計算此時的
綫路電壓損失等於：

$$\Delta u_1 = \sqrt{3} \times I_1 (R \cos \varphi + x \sin \varphi) = \sqrt{3} \times \\ \times 189 (2.1 \times 0.7 + 3.2 \times \sqrt{1 - 0.7^2})$$

$$= 1,230 \text{ 伏, 或 } \Delta u_1 \% = 1,230 / 35,000 = 3.52 \% .$$

當力率為 0.85，負荷電流 $I_2 = 155$ 安時，綫路的電壓損
失將為：

$$\Delta u_2 = \sqrt{3} \times 155 (2.1 \times 0.85 + 3.2 \times \sqrt{1 - 0.85^2}) \\ = 938 \text{ 伏, 或 } \Delta u_2 \% = 938 / 35,000 = 2.69 \% ,$$

由於提高力率後，綫路電壓損失降低百分比是：

$$\Delta u \% = \Delta u_1 \% - \Delta u_2 \% = 3.52 \% - 2.69 \% = 0.53 \%$$

4. 提高力率可以降低供電電價成本，節省有色金屬和其 他建築材料

上面所提到的提高力率的效果一方面可以認為設備的運
行條件得到改善，另一方面又可以理解成為電力系統各個部
分的利用率和潛力充分地得到發揮，因此可以減少國家對電
力工業不必要的投資和節省很多器材。例如上海地區，據統
計力率每提高 1 % 相當於發揮電力系統潛力 1.2 % 左右，又如
蘇聯電力系統平均每降低 7 仟乏無功功率的消耗量就可以節
省發電廠 1 仟瓦的設備裝置容量（前者的投資僅占後者的四分
之一左右），尤其我國電力部門的投資，由於很多大型設備
（如大容量發電機、汽輪機，高溫高壓鍋爐）目前暫時還不
能自行製造，得花大量外匯向國外換取，材料方面如有色金
屬（銅、鋁），建築材料（鋼鐵、水泥）以及電氣絕緣材料
等對我國當前來說供應也是很緊張的，這樣更可體現出提高
力率的節約效果和它的意義。此外，系統中設備利用率的提
高，對發電廠每發一度電（一仟瓦小時）的煤耗以及經常維

护費用的减少也有着密切的关系，这就对降低电价成本，減輕用戶負担創造了条件。

二、提高力率对企业用戶的关系

1. 减少企业按二部电价計算的电費支出

一般除了生活用的电灯及电热負荷是按电度表的仟瓦小时数支付電費外，企业用戶的电費支付标准將有所不同。这是由于各类企业的平均力率大小不一致的緣故（例如，电气冶煉、电解、电热及鍛压設備較多的企业力率很高；机床、起重机械、电焊設備較多的企业力率較低）。如果电业部門一律按实际耗电量（仟瓦小时）和基本电价作为收費标准时，將給国家帶來很多額外的損失并直接影响到电价成本，这样无形中使原来力率較高的企业額外地負担了一部分由于力率很低的用戶所引起的損失費用，这显然是不合理的。所以目前我国的工业用戶电价收費标准除了按国家規定的各地区的基本电价和电度电价的制度执行以外，还須发了全国統一的按力率而調整电价的附加制度（制度分自然調整和机械調整力率二种），凡是用戶力率超过規定时，可以适当地降低按月应繳納的电費以資獎勵；而用戶的力率不足規定标准时，就要增收電費作为懲罰。一般地說来，力率过低的用戶，按月增收的电价罰款是很惊人的。

2. 用戶力率的低劣，使設備利用率不高

用戶力率的低劣，絕大部分是由于用戶本身內部所裝設的电动机、变压器的負荷不足、利用率低，使得設備的內在潛力沒有得到充分的發揮，这样就会引起企业用电量的增加，換句話說，單位产品耗电量的增加將直接影响到产品成本。

3. 提高力率可以减小用戶配电变压器裝置容量

对于較大的企业用戶，通常都采用高压供电16~10千伏甚至更高的电压，而用电設備却絕大部分是220/380伏低压的，所以企业用戶內部也要設置配电变压器。如果力率低，供給同样千瓦数的电力負荷也需要裝設較大容量的变压器，只要設法提高低压綫路的力率，可以在不变变压器容量的同时扩大供电范围；或者在已定千瓦数負荷的条件下减小变压器的裝置容量。例如要求确定設計中某車間变电所的变压器容量，已知車間380伏低压綫路的預計用电負荷是 $P=460$ 千瓦， $Q=680$ 千乏。这样，車間低压总的需要容量 $S=$

$$\sqrt{460^2 + 680^2} = 820 \text{ 千伏安, 而力率 } \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{460}{820} = 0.56,$$

应选择一台容量为1,000千伏安的TM型配电变压器。現設計中規定采取措施將无功功率的需要量减少450千乏，此时低压总的需要容量將为 $S = \sqrt{460^2 + (680 - 450)^2} = 510$ 千伏安，

$$\text{而力率 } \cos\varphi = \frac{460}{510} = 0.89。 \text{在这种情况下选择一台容量为}$$

560千伏安的TM型变压器就能够滿足需要了。

4. 提高力率可以降低用戶內部配电綫路的功率損耗

因为力率的提高而使用戶內部綫路的負荷电流减小，不但可以降低綫路的功率損耗，甚至有时还可能减少导綫截面，节省有色金属及其他等。大家知道，企业用戶的电力和照明配电綫路的分布范围极广，深入厂区及車間各个角落，犹如蜘蛛網一样，所以这方面的节省也是很可观的。何况这些功率損耗都是計入企业受电盤处的电度表內，同样要支付电费。

5. 提高力率可以改善用戶生产設備的运行条件

企业用戶力率的提高毫不例外地也会减少它的內部綫路

的电压損失。有时虽然电力系统所供应的电力（电压）是符合标准的，但是企业内部力率过低，也会影响到用电设备的运行。例如普通电灯的发光强度与电压的 3.4 次方成正比，严格地说要求离电源最远处灯头的电压損失在正常情况不得超过額定电压的 2.5%，否則就会降低照度标准，影响人們視力，如果力率不好，那么要滿足上述要求就必须加粗照明线路的导綫截面。再如一般通至感应电动机端鈕处綫路的电压損失在正常时最好不超过額定值的 5%，否則会影响电动机的正常起动（因为感应电动机的轉矩与电压平方成正比），电焊设备的电压損失过大也会影响焊件質量，尤其是有些冶金、化工企业由于綫路电压的波动（电压經常性的高出或低于額定值）太大往往会产生廢品。这样看来提高力率来改善电压質量对用户的好处也是不胜枚举的。

6. 提高力率可以保证用户设备运行的安全

从生产及运行安全角度出发，提高力率可以不致于引起按正常力率而設計和选择的用戶綫路、电气设备等受到过負荷，这样也就可能减少了由于过热、絕緣損坏而造成的漏电、火灾事故，既保证了安全生产又提高了设备的使用年限。

总的來說，力率的提高不仅对电力系统起了巨大的作用，而且对于企业用户來說，好处也是很多的，所以各个有关部门必須共同努力来挖掘电力方面的內在潛力，使供电，变电以及用电各方面的工作都做得正規、合理而且經濟。

第三章 造成力率低的原因是什么

大家知道，企业用户力率的高低完全决定于企业所消耗

的从电力系统得到的无功功率的大小。根据很多工业部門的經驗数据統計，感应电动机所消耗的无功功率最多，占70%以上，变压器的消耗約占20%，其余的10%左右供电抗器、架空綫路、各种感应电器及仪表等等消耗用。因此可以得出这样一个結論，感应电动机和变压器是工业企业无功功率最主要的消費者，如果这些設備的選擇及使用不够合理，就会引起无功功率消耗的增加和力率的降低，而原因主要是由于：

1. 沒有正确和合理地選擇感应电动机的型号和規格

感应电动机为了适应各类生产环境和条件的需要它構造、轉速及型号也有所不同。通常轉速高的电动机力率要比同容量的低速电动机来得高，这是由于低速电动机的励磁电流較大的緣故。但是不少用戶却認為低速电动机的轉矩大、运行安全而乐于采用。其实低速电动机的轉矩虽然大（因为轉矩与速率成反比），但与同容量的高速电动机比較，經過不同比例的減速（加速）傳动裝置后，設備本身所接受到的轉矩还是一樣的，但是实际力率及效率却不相同，例如同样一台380伏、14仟瓦的A型电动机轉速为2,910轉/分的額定力率是0.9，而轉速为730轉/分的仅有0.81。

过分注意电动机的容量選擇而忽略电动机的構造和特点在目前也較普遍。例如起動轉矩較大的重型設備（球磨机、压力机、鍛錘及冲床等）若采用一般电动机在起動时嫌轉矩小，当然加大电动机的額定容量也是解决的办法，但是正常运行时就会显得負荷不足了，在这种情况下應該考虑起動轉矩較大的用电阻起動的繞綫型电动机或双鼠籠型电动机。

电动机力率的大小既然与励磁电流有关，而励磁电流的大小又为电动机磁路的体积所决定。在一般情况下，容量、

轉速和構造型式相同時，鼠籠型感應電動機的力率約較繞線型電動機的力率高出 4~5%，效率約高出 3%。根據生產環境條件的允許下應尽可能地裝設開啟式或保護式的電動機而不要裝設動力指標較低的封閉式電動機。所以在選擇感應電動機的同時不能忽略上面所談的一些因素。

2. 感應電動機的容量選擇不合理或使用不當

感應電動機的力率和效率一般均在接近滿載時最高，圖 6 中列出了開啟式及保護式電動機效率及力率隨負載而變化的曲線，從圖中可以看出效率及力率基本上和電動機的負載大小成正比。但是某些企業對節約用電，改進力率的認識不足，却反而認為寬打窄用可以有備無患，能夠防止電動機過熱和事故

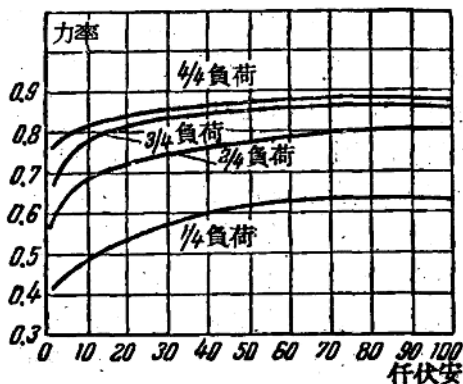
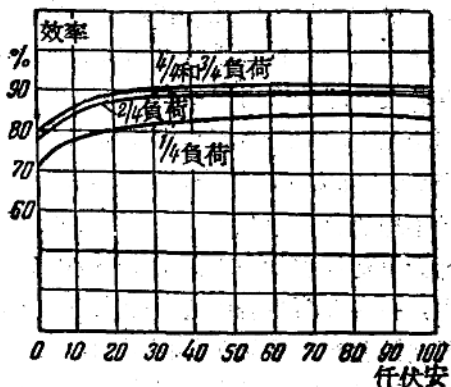


圖 6 電動機容量與平均效率及力率的關係

甲—開啟式及保護式電動機容量與平均效率的關係曲線；

乙—開啟式及保護式電動機容量與平均力率的關係曲線。