

〔苏联〕A. A. 塔依茨著

改善工业企业电气装置的 功率因数

科学技術出版社

譯 序

苏联在一九五三年末由“莫斯科 Ф. Э. 得謝尔伊斯基工程技术人員之家”会同“动力工作者全苏科学技术协会莫斯科分会”共同召集了一个研究在工业中节约电能的科学技术大会，会上审查和討論了很多有关的論文和問題，会后將会上涉及范围較广及較有意义的材料汇集成，“工业企业中电能的节约”(Экономия Электроэнергии на Промышленных Предприятиях 1954年, МАШГИЗ 出版)一書。

本書即該書中的一个文件，原作者为科学技术碩士 А. А. 塔依茨。

鉴于目前我国各电力系統中，对于提高功率因数，尚是一項十分迫切的問題，而在这一方面的資料还不多，故特將其譯出，以供工业企业电工技术人員及用电監察人員参考。原文較長，譯者摘其要者譯出，并为使內容較有条理及段落分清起見，由譯者另加小标题，以利閱讀。刪去者主要为涉及同期調相机及同期电动机强行励磁等的一部分；关于如补偿裝置型式，及其安裝地点的選擇，選擇补偿裝置型式的技術經濟計算的方法，以及靜电电容器的構造和运行上的特点則全部譯出未予刪节。

譯文如有不妥善之处，希望讀者提出意見以便改正。

譯者 1956年10月

目 錄

一、電力系統中無功功率的平衡及最适宜功率因數的確定	1
(1)電力系統中無功功率的平衡	1
(2)電力系統中最适宜的功率因數的確定	5
二、補償裝置型式及其安裝地點的選擇	8
(1)同時使用有功功率的補償型式	8
(2)不同時使用有功功率的補償型式	11
三、選擇補償裝置型式時技術經濟計算的方法	16
(1)各種補償裝置的單位年運行費用	17
(2)以同期電動機代替感應電動機經濟上合理性的計算	18
(3)感應電動機同期化經濟上合理性的計算	19
(4)在用戶處安裝補償裝置時節約的計算	20
(5)同期調相機與靜電電容器經濟性的比較	21
(6)靜電電容器配置的計算	26
四、補償裝置的某些構造上和運行上的特點	28
(1)靜電電容器	28
(2)同期電動機	41
(3)感應電動機的同期化	47
(4)同期調相機	49

引 言

工业企业电气裝置的功率因数低劣要引起发电厂热力設備和电气設備負荷的額外增加和其原設計功率的降低，使得輸电綫路，变电所和配电网絡的出力不能充分利用，以及电能損失的增加和电压降低；也使发电厂电能成本和工业企业电能的价格增高。

在本文中將闡明基本的情况和在采用特殊的补偿裝置以改善功率因数方面的措施。

一： 电力系統中无功功率的平衡及最适宜功率因数的确定

(1) 电力系統中无功功率的平衡

电力用戶除有功功率外还获得由电力系统发电厂的发电机供給的无功功率。

感应电动机、变压器、高压輸电綫路都是无功功率的消耗者。感应电动机所消耗的无功功率为其所耗有功功率的 50~100%。

高压輸电綫路对于无功功率的消耗是因为它的感抗超过有效电阻数倍的緣故。一般电压为 110 千伏的綫路，依导綫的截面及导綫間距离的不同，其感抗較其有效电阻大 2~2.5 倍。

高压变压器的电抗約較其有效电阻大 10~15 倍；其中无功

功率的损失为其输出功率千伏安数的 11~14%。

这样，在电力系统中必须予以补偿的无功功率，极大部分是直接用电设备所需功率的 30~40% 的功率损失，可见，无功功率的损失值是大大地超过有功功率损失的。

循环在电力系统个别部分中的无功功率可以达到相当于有功功率值的 70~100%。

发电厂的同期发电机、同期补偿器、在过励磁下运行的同期电动机、静电电容器等均为无功功率发生器。

同期发电机为无功功率的主要源泉。在若干电力系统的实际工作中，由于发电机转子或定子电流的过负荷，个别发电厂在降低电压和周波的条件下不能保持所规定的无功负荷分配曲线。在同样的有功负荷下，因为电压的降低引起了发电机有功电流成比例地增长，发电机定子即因电流增加而过负荷。为了减少定子中过量的电流，电压降低很大时，须使电机励磁作必要的降低，这时无功功率也就降低了。

保持电压不变而降低周率时，要得到同样的电动势，就要求励磁有很大的增加。这时由于铁芯的饱和，励磁电流就得增加很多。当周率降低很多时，即使转子电流达到极限值，仍不能达到保持必要的电动势的目的，电机的无功功率也就降低很大。

所以，在电机有功功率的负荷不足时，其无功功率的获得，较之在额定有功功率和额定电压但小于其额定表观功率的千伏安数（设计计算这一电机时所用的千伏安数）时所获得的，只可能在一定的程度上略大一些。

在图 1 上表示出在各种不同的有功功率值时，“电力”工厂的透平发电机的最大容许无功功率变化的曲线。

图上额定有功功率（100%）与电机 100% 的额定表观功率

相适应。在额定功率因数 $\cos \varphi$ 等于 0.8 时(表观功率为 100% 时——譯注),我們得到:

$$P = S \cdot \cos \varphi = 100 \times 0.8 = 80;$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 100 \times 0.6 = 60。$$

这样,电机的额定有功功率只为其表观功率的 80%,而无功率相应地只为 60%。

当 80% 功率时,在同样的功率因数时其有功功率的向量值将为 $80\% \times 0.8 = 64\%$ 。

在 80% 有功负荷时(即当有功功率的向量值为 64% 时——譯注),依綫圈的发热而决定的功率因数极限值等于 0.687。在这样的情况下,表观功率

$$S = \frac{64\%}{0.687} = 93\%,$$

而无功率 $Q = \sqrt{93^2 - 64^2} = 67.3\%$ 。

由此可以看出,同期电机甚至在經常的负荷时也不能供給出額定的表观功率。如果发电机在經常的有功功率时(当有功功率为 80% 时)在其額定的 $\cos \varphi$ 下工作,其无功功率的自由备用量占其额定表观功率千伏安数的百分数为:

$$67.3 - \frac{64 \times 0.6}{0.8} = 67.3 - 48 = 15.3\%。$$

当电压的升高或降低超过额定值的 5% 时,电机的无功功率应当减少,当发电机有着高的额定功率因数时,这一减少將大得

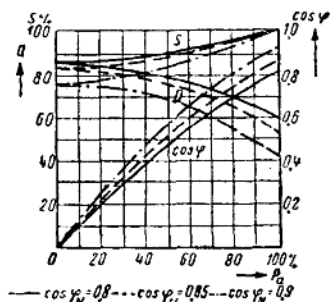


图 1. “电力”工厂的透平发电机在各种不同的有功功率时,其最大容許无功功率值变化的曲线

很多；保持額定电压但周率降低时，在同一有功負荷下无功功率也要减少。

从发电厂发电机所附加得到的无功功率，在初期費用(按即基建的投資——譯注)方面是最便宜的；并較特殊补偿裝置的每一千伏安的裝見容量便宜。所以，极希望在发电机的同一有功功率时增加其表觀功率。从这一观点出发最适宜于制造功率因数不超过 0.8 的发电机。但在建造这样的大容量的透平发电机时遇到了制造上的和構造上的困难。現时建造容量为 50,000 瓩、3,000 轉/分的透平发电机，其功率因数为 0.85；25,000 瓩以下、3,000 轉/分的透平发电机，其功率因数为 0.8。

高压輸电綫路由于具有电容，可以視為是无功功率的发生器。由其所发生的无功功率减少了其中的功率損失(感应的)，并且在一定的情况下可以完全抵消它們。

在电力系統中正确的分配无功負荷就需要作出无功負荷曲綫，并要求將負荷分配在各发电

厂間。无功負荷曲綫与有功負荷相比較时，它的特点为在全年中最低及最高負荷間沒有显著的差別。

图 2 为依我們某一电力系統所制成的曲綫。从这一曲綫可以看出无功負荷最高負荷与有功負荷最高負荷的比在 12 月为 59.9%，而在 6 月为 89.3%。

通常发电厂的发电机并不全部抵偿无功負荷的最高負

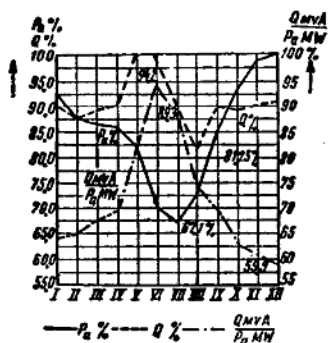


图 2. 电力系統无功負荷最高負荷与有功負荷最高負荷之比

荷,因此它应由补偿装置来降低,这些补偿装置装设在用户处以及电力系统的负荷最重的中心变电所。

(2) 电力系统中最适宜的功率因数的确定

无功功率的最有利的分配与保证电力系统电网中电能损失的最小数量有着紧密的联系。

所以工业企业变电所与电力系统有联系的母线上的最适宜的功率因数,应由电力系统来决定和规定。这一数值决定于电力系统发电机的无功功率的分配情况、无功功率的损失、电力系统变电所中的补偿器的容量和用户电气装置的无功功率。

最有利的功率因数,应该在发生和输送有功和无功电能方面使全年的费用最小。苏联电站部很多电力系统所进行的计算显示出,在近几年中由于在电力用户处装设补偿装置的结果,电力系统变电所母线上的功率因数应在最高负荷期间近于 0.92~0.95。

鉴于目前①电力系统的功率因数距离最适宜的值还低得很多,同时各电力系统中还有许多的过负荷的变压器和线路,系统的同期补偿器即使在夜间也仍须运转,因之现时各用户对无功功率进行补偿时电力系统通常均不予限制。

然而,在不需要无功功率的电力网工段中,安装补偿装置是不允许的;除非当这些装置可以使电网中的损失大大降低使电力系统的设备减轻负荷的时候,或者当有必要保持用户的额定电压的时候。

最适宜的功率因数用比较补偿无功功率后所节约的成本

① 这是苏联 1953 年的情况。在 1954 年时全苏装有静电电容器 400 万千乏,约为其最高负荷的 12~15%。——译注

和在补偿装置上的全年费用的方法以及用对于不同的补偿方式的技术经济计算的方法来决定。

为了保证用户处额定电压所需最小的必需补偿装置的容量决定于下列等式——平衡：

$$Q_c + Q_n = Q_{\Sigma} + Q_{\Delta}$$

式中： Q_c ——发电机所供给的无功负荷； Q_n ——待求的补偿装置的容量； Q_{Σ} ——适应于用电设备处电压额定水平的用户的无功负荷； Q_{Δ} ——电网中无功功率的损失。

Q_c 和 Q_n 的值根据现有的负荷或者根据电力系统的发展计划，在分析电力系统统计资料的基础上来确定。这样，决定最小必需的补偿装置容量，就在于计算电网中无功损失的数值。

在抵偿无功负荷全年大体不变的电力系统中，确定补偿装置容量时，采用有功负荷年最高负荷时期来进行计算。

为了保证用户电力供应的质量，正同在编制有功功率的平衡表时所采用的办法一样，发电厂发电机在抵偿部分无功负荷最高负荷时，应考虑到留下约 10~15% 的备用容量。

用户无功负荷的综合最高负荷(Q_{Σ})根据个别 35~110 千伏的变电所和联接到发电厂发电机母线的用户的负荷增长的计划来决定。

根据运行的资料来采用同时率；并应考虑到无功负荷同时率通常较有功负荷大 5~10%。

在线路和变压器中的无功功率损失(Q_{Δ})，由空载损失和负载损失二者所组成。这一损失根据预先进行的电流分配的计算来决定，分配时要考虑到损失与具有表观功率的变压器和线路的负荷的大小有关系，而这一表观功率则又与待求的补偿装置的容量有关。在 Q_c 与 Q_n 值的这种相互关系的情况下，可用渐

近法来进行計算，先不考虑补偿装置，算出 Q_n 的值，然后再决定它們相应的容量。

所求出的补偿装置总容量根据电力系统个别負載的环节来分配并按电力网进行电流分配的計算。根据这一計算确定 $Q_{n, \text{min}}$ (即最小的 Q_n ——譯注) 并再依此确定 $Q_{c, \text{min}}$ (即最小的 Q_c ——譯注)。

电力系統中无功損失的总的数值基本上由变压器中的損失来确定，所以它实际上是与变电的次数有关的。

輸电綫路中的无功損失 (由于电容的影响) 的值相当小；但綫路中无功損失的負荷分量的計算，在电网結構复杂时是最困难的。所以在概略的初步的資料中，确定綫路中負荷損失可以根据較簡化的电流分配的計算方法，不考虑个别綫路中 r/x 的差別，并用电网路綫的人为的簡化的方法 (除去輕負載的对角綫聯絡綫)。

为了求得补偿装置的容量，在第一次近似計算中，无功損失的值可以粗略的不以电流分配的計算来确定，而从下列的前提条件出发，即全系統平均的变压器負載接近于 70%，而綫路的平均負載接近于經濟的負載。在这些前提条件的基础上計算出的單位无功損失的数值列于表 1 中。

为了确定无功損失并依之初步确定补偿装置容量，实际上只須計算电流分配一次。

表 1 变压器中无功功率的單位損失

电压, 千伏	35 6-10	110/35-10-6	110 35/6-10
无功損失占变压器表观功率的%	10	12	14

在某一用戶處必須安裝的補償裝置的容量依下式確定：

$$Q = \frac{W_a(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)}{Tk}$$

式中： Q ——補償裝置容量； W_a ——有功電能年消耗量； $tg\varphi_1$ ——從安裝補償裝置前的加權平均功率因數（ $\cos\varphi_1$ ）得來的數值； $tg\varphi_2$ ——從安裝補償裝置後在用戶進線上功率因數（ $\cos\varphi_2$ ）得來的數值； T ——補償裝置容量年利用小時數； k ——供給至電網外部無功電能的係數（當供給至電網外部的無功電能為全部無功電能的10%時， $k=0.9$ ）。

當電容器組容量不能調整時， T 等子在相應的時間中將其合入的持續時間。如電容器組容量不能調整而僅在非工作日被切斷時，則可取 T 全年等於7,200~7,500小時。

$\cos\varphi_2$ 的值，由電力系統根據系統中無功功率的平衡，以及在電網中各不同點處在各種不同程度的功率因數改善時所得到的經濟效果，而予以規定。

二. 補償裝置型式及其安裝地點的選擇

現在採用的無功功率補償型式有兩種：(1)同時使用有功功率的；(2)不使用有功功率的。

(1) 同時使用有功功率的補償型式

這種補償的型式是較經濟的。無功功率可以採用下列任一措施來補償：

1. 安裝有超前功率因數的同期電動機；

2. 在感应电动机上接装进相机;
3. 使工作中的感应电动机同期化。

1. 同期电动机在用作无功功率发生器的同时, 可能用之于拖动机械是这些电动机较大的优点之一。同期电动机中无功千伏安的成本是很小的, 因当将机器的功率因数由 1 改成超前 0.8 时, 其成本的增加是不大的。

当启动力矩不超过额定力矩的 1.5 倍时, 同期电动机不需要要求较软工作特性亦可以用作拖动之用, 此时, 电动机应以小于 0.99 的超前功率因数工作。

同期电动机的选择应只依其轴上所必需的功率(瓩)来进行, 无功功率的获得作为是额外的。当电动机轴上的负荷减少时, 其无功功率就会比较不大的略增, 而同时其表现功率则剧减, 因此其装置容量即不能充分利用。

当企业中每一个电动机的容量大于 100 瓩时, 则在现有的工业企业中安装同期电动机以替换感应电动机是经济合理的。为了决定电动机替换的经济上合理性的问题, 必须以安装同期电动机的方案与安装静电电容器的方案作技术经济的比较。

有些企业中, 具有许多容量为 180~200 瓩的电动机的压缩空气站和水泵站, 且由变电所母线直接供电者, 在其电网中用同期电动机来替换部分感应电动机, 可以显著的改善其功率因数。

2. 在运转中的电动机上加装进相机时, 化费在补偿上的代价较以同期电动机来替换感应电动机便宜得多。

进相机的每一千伏安差不多可以与电网被补偿的 30 千伏安的无功功率相等, 因为补偿的发生是通过极低周率的转子的

(其周率約为电网的 3% 左右), 而所获得无功千伏安的成本是极低的。

同期电动机与具有进相机的感应电动机的价格比較显示出: 电动机容量小时, 加裝进相机較貴。容量約在 300 瓩以上时, 具有进相机的感应电动机的价格与以降压启动的同期电动机的价格一样; 而以全电压启动的同期电动机的价格則較具有进相机的感应电动机的价格低。

两种型式电动机的效率差不多沒有差別。

具有进相机的感应电动机的优点为: 不論在負載下或在空載时, 其功率因数值均可变更, 并可增加其过载力矩。

3. 感应电动机的同期化只能在每一个别情况下, 在經過对这一补偿方法的經濟性与是否有利的驗算之后, 才可以采用; 同时它只用在具有容量为 100 瓩以上、有功負荷約为其額定負荷的 50% 以上而又沒有調整轉速的必要性的繞綫式轉子感应电动机上。

繞綫式轉子感应电动机的同期化只有在: 无功功率不足的区域中, 經過不少于二次的变电供电时和特別在具有很低的功率因数的用戶处, 才是經濟合理的; 而只有在沒有显著的电能损失时才是有利的; 这一損失对所获得的每一无功千伏安不应超过 4~5%。通常这一补偿的損失約为 1.5~7%, 依电动机的容量和其荷載的程度而定。

在有些情况下(用戶接近发电厂或变电所), 特別是在高压电动机时, 同期化的損失可能大于电网中由于改善功率因数而降低的損失。毫无疑义, 在这些情况下同期化是不相宜的。

不应以感应电动机的同期化当作調相机使用, 因为此时每 100 千乏所耗有功电能將达 15~25 瓩, 亦即將比一般的同期补

偿器高得多。

由于无功电能需要量的减少，在用户设备和电网各部分中有功损失即减少，因此也减少了电功率(电能)损失，这一点即用以作为感应电动机同期化经济性的起始的准绳。

有功功率(或电能)节约的多少应依在电网规定点上的经济当量与在同期化上所耗的单位有功功率的差数来确定。

同期化电动机不能过载为其缺点。此外，当对感应电动机转子供以直流电时，依其转子线圈结线不同，电动机将在其额定负荷的40~80%时被自动同期。因此，当传动时，只在没有过载、没有尖峰时和不是重力启动时才可以使感应电动机同期化。

(2) 不同时使用有功功率的补偿型式

此种型式有下列两种方法：1. 当作调相机用的空载运转的同期发电机；2. 同期调相机^①；3. 静电电容器。

1. 利用空载运转的同期发电机当作同期调相机以改善功率因数，亦即使发电机在超前电流下运转的方式，只有当发电所有着空闲的发电机并且当其与原动机(透平)没有联接时才是可能的。

实际上，在正常装配的情况下解开发电机与蒸汽透平间的耦合器是很难实现的；即使可能，则当其连接回去时就需要相当的时间。因之，发电机在没有可解式耦合器(靠背轮)时，就不能在必要的情况下被迅速用之于正常运转中去。

^① 在欧美的出品中尚有一种同期电容机，其与调相机之不同在于：同期电容机只能以超前功率因数运行，而调相机则既可以超前亦可以滞后功率因数运行。——译注

此外，在应用所謂周率启动时，当其与原动机断联后，还必须有一个空闲的发电机或启动电动机和耦合器。

利用拆下的旧的同期发电机只能在其没有很大的损失时才可以用作补偿之用，而这是少有的事，因为，旧发电机通常較之現代的同期調相机有着不良和相当低的效率。

这些发电机只可以在預先經過这种补偿方式的技术經濟上的合理性的檢查之后，并在确定了在这样做时的电能损失数值之后，才可加以利用。

2. 同期調相机，如所周知，就是輕便構造的空載运行的同期电动机。

同期調相机不能負載机械負荷，在工厂电气裝置中，大都是用来改善功率因数的。

采用容量小于 5,000~7,500 千伏安的同期調相机，在經濟指标上來說，是不經濟的。这就限制了它的应用范围，只裝在电力系統的区域变电所中和大用戶的变电所中。

3. 靜电电容器在用电戶的电气裝置中被广泛的采用着，在現有的电网中，由于用电容器而改变了功率因数，使电能损失可以显著的降低。

靜电电容器的安裝費用可以迅速得到抵偿：每 5~7 千乏容量的电容器即可使发电厂的裝見容量多發揮出 1 瓩的能力。而后者在价格方面超过电容器的价格达数倍。

靜电电容器可以裝置在下列地点：

(甲)將电容器連接至中心变电所或变压器变电所的高压 (2~10 千伏) 或低压汇流母綫上，通常是經過單独的开关，这就是集中补偿；

(乙)裝在車間的分配电盤处，这就是分組补偿；

(丙)經過共同的閘刀开关裝在个別的用电設備处，這就是單獨补偿。

当补偿裝置安裝在电力用戶的附近地方，則电网的无功功率負荷即减少。因此就降低了有功功率和电能的損失以及电压損失；在个別的情况下尚有可能使电网导电部分的截面减小和使变压器裝置容量减小。

但在另一方面，將同期調相机改为高压靜电电容器，甚至再改为低压电容器，亦即当补偿裝置接近电力用戶之处时，补偿裝置的單位价格亦就增加了。

因此，不同补偿方法的技术經濟比較就在于：將由于电网无功負荷的减少而多得到的節約与在安裝較貴型式的补偿裝置上增加的化費进行比較。

在低压处的**集中补偿**只在下列情况下才是經濟上合理的，即当由于生产条件而將电容器裝置在分配电盤处不可能时才是合理的；在这一情况下，將电容器配置在变电所或变压器室的主配电盤处可以認為是正确的。

以**分組补偿**与集中补偿相比較，当电容器的費用一样时，則前者具有着优点，即当將电容器安裝在分配电盤处，則在联接变压器变电所低压母綫和分配电盤的导綫或綫路中可以获得电能的巨大的節約。

分組补偿与**單獨补偿**相比較，照例也是比較可取的。当电容器用与电动机共用的閘刀开关安裝在个別的电动机处时，电容器功率的利用即銳减，因为此时电容器接入的方式与电动机接入的方式有关联。所以在电网中每一千乏裝置的电容器所得到电能的節約，較之分組补偿时减少了。在后者的情形下，电容器接入的时间可以較長，即依整个用电設備組的工作持續時間

而定。

按照电动机接入的平衡的条件，单独补偿时电容器的容量较分组补偿时为大，因之其费用也就较分组补偿时为大（当补偿效果一样时）。

因为大多数情况下电容器的标准容量不可能保证其容量与电动机所需无功功率间的经济的比例，所以单独补偿方法也较分组补偿方法效果较小。由于这个缘故，在个别小容量电动机（它通常也使功率因数变坏）处安装电容器时，常发生无功功率的过补偿，因此，在从分配电盘到用电设备的配电导线中电能损失增加了。

将电容器直接配置在电动机的附近并不经常是可能的，并且由于生产过程和机械维护的条件，在任何情况时都是不希望如此的。

只在无功功率的需用很大，且距离分配电盘远的时候，单独补偿才能是经济合理的。

采用何种补偿方法的问题有争论时，则补偿装置型式、电压及安装地点的选择，应考虑到电网工作方式和接线的具体特点根据后面所援引的方法进行（按指第三节的方法——译者）。

在电力系统缺乏无功功率或需将功率因数提高到较高限额的情况下，采用安装在区域变电所或大工厂变电所中的同期调相机是适当的，特别是当其为日夜不间断工作时。当同期调相机与静电电容器的价值有巨大的差额和电价高时，则在用户电网中安装静电电容器是提高电力系统功率因数的最经济的方法。

在 0.38—0.5 千伏的电网中，用装置在分配电盘处的 0.38—0.5 千伏的静电电容器或用混合安装 0.38—0.5 千伏和