

4020



农村小型水电丛书

感应发电机 在农村电站中的应用

水利电力出版社编

水利电力出版社

4020/773
TM3

內 容 提 要

本書是由我社委托的北京电业局中心試驗所的几位同志，根据国内各地已有的經驗，并根据中心試驗所几年来的試驗研究成果，以及男联在应用感应发电机方面的先进經驗，編写而成的。

本書从理論上論証了感应发电机在农村小型电站中应用的优越性，使讀者閱讀以后，可以得到系統的知識。

全書共分为四章：第一章介紹了感应发电机的基本知識；第二章敘述了确定靜电电容器容量和选择电容器的方法以及电容器的連接方式，第三章論述了运行中的許多問題，如：电压調整，失磁处理，并列运行，开停程序，不平衡負荷，防雷保护，綫路降壓以及安全等問題，对这些問題的，分析也比較全面；第四章說明了在农村电站中采用感应发电机的优越性，介紹了水电站出力的試驗方法，并論述了感应发电机在我国农村电气化事业中的美好前途。

本書可作为农村水电站、火电站、潮力发电站、风力发电站的中級电气技术人員的学习材料和工作中的参考，亦可供从事电机試驗研究工作的技术人員的参考。

农村小型水电叢書

感应发电机在农村电站中的应用

水利电力出版社編

*

1366D390

水利电力出版社出版(北京西便門外大街22号)

北京市書刊出版業營業許可證出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店发行

*

187×109²毫米开本×116印張×26千字

1958年9月北京第1版

1959年1月北京第2次印刷(10,101—30,220册)

統一書号：15143 1092 定价(第9类)0.14元

新 聞

感应电动机能作为发电机运行，在理論上是众所周知的事；且感应电机結構簡單、价格低廉、运行可靠，作为电动机运行，在工业上早已获得广泛应用；但作为感应发电机运行，付諸实践的，尚不多見。直到去年我国农村社会主义高潮到来之后，农业获得了空前的大发展，水利化、电气化空前跃进，农村小型水电站普遍建立，形势需要提高了感应发电机的历史地位。

事实上，在苏联农业电气化过程中，感应发电机的使用早已取得了很多的宝贵經驗。

以往人們認為自激感应发电机有着笨重昂貴的电容器，很不經濟；或者認為作为感应发电机运行必須有交流电源励磁，即必須与同步发电机或电力系统并联运行，实际上并不如此。我們根据苏联經驗及国内的几篇有关报告論文，汇编成这本小册子，論証了感应发电机在农村小型水电站中应用的技术經濟上的优越性；并就有关原理、特性、試驗、及若干运行問題加以論述。

北京电业局中心試驗所的几位同志应本社之請，主要利用业余时间，匆匆編成。由于缺乏运行經驗及水平有限，錯誤不当之处在所不免，希各有关方面补充修正，以便滿足当前农业大跃进之需要。

目 录

第一章 感应发电机的基本知識.....	3
1-1 什么叫感应发电机.....	3
1-2 感应发电机的发电原理.....	4
1-3 空载自激情况.....	5
1-4 負載調整特性.....	9
1-5 轉速不变时电容与电压的关系.....	11
1-6 电容量不变时轉速与电压的关系.....	11
1-7 电压不变时电容与周率的关系.....	13
第二章 电容器.....	13
2-1 电容量的确定.....	13
2-2 电容器的連接方式.....	15
2-3 靜电电容器的选择.....	18
第三章 运行問題.....	19
3-1 負荷性質.....	19
3-2 电压調整問題.....	20
3-3 失磁的处理.....	21
3-4 并列运行.....	21
3-5 开停机操作程序.....	22
3-6 不平衡負荷問題.....	23
3-7 小型水电站的防覆保护.....	23
3-8 綫路压降問題.....	25
3-9 日常維護工作.....	25
3-10 安全問題.....	26
第四章 感应发电机在农村中的应用.....	27
4-1 采用感应发电机的优越性.....	27
4-2 动力問題.....	31
4-3 水电站的出力試驗.....	32
4-4 感应发电机在农村电气化中的前途.....	34
参考文献.....	36

第一章 感应发电机的基本知识

1-1. 什么叫感应发电机？

电机有两种：同步电机和异步电机。

同步电机是这样一种交流电机：它的转速 n 对电网频率 f 保持着恒定的比例关系：

$$\text{即 } n = \frac{60f}{P}, \text{ 或 } f = \frac{Pn}{60},$$

式中 n ——转子旋转速度，转/分；

P ——磁极双数；

f ——频率。

同步电机是作为三相交流发电机而获得广泛应用。

异步电机是这样一种交流电机：它在恒定的电网频率下转子转速随负荷而变化。它几乎专门用作电动机运行，所以异步电机常称为异步电动机或感应电动机。

依据电机的可逆原理，感应电动机在超出同步转速时，可以当作发电机运行，所以叫做感应发电机或称异步发电机。

把感应电动机当做感应发电机运行时，在有电网的地方，不需要改造结构和增加附件，只要和同步发电机并列运行，即可当作感应发电机使用；在没有电网的地方感应发电机需要单独运行时，只须在静子上并联适当容量的静电电容器即可作为自激感应发电机（以下简称感应发电机）运行。所以说，感应发电机即为普通的感应电动机在特殊条件下的一种运行方式。

1-3. 感应发电机的发电原理

感应发电机的发电原理基本上和同步发电机的情况相似；两者所不同之处在于同步发电机用励磁机发出直流电，供给转子线圈，产生激磁作用，即所谓“直流激磁”；而感应发电机不用励磁机激磁，而用并接在静子线圈上的静电电容器所产生的电容电流激磁，即所谓“自激磁”；另一种激磁方法是：当感应发电机与同步发电机并列运行时，电网的三相交变旋转磁场与感应发电机本身合成磁场的相互作用而“激磁”，这样虽然省去了电容器，但在没有电网的农村是办不到的，况且有电网时小型发电机与电网并列供电也是不经济的。

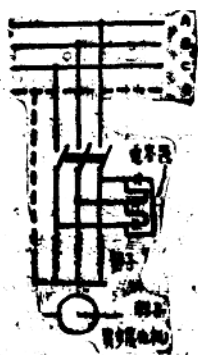


图 1-1 感应发电机线路图

三相感应电动机，不论是绕线式的或是鼠笼式的，不管用什么原动力拖动，只要把它拖到稳定的合乎要求的转速，在静子线圈上并联有三相静电电容器就能发电。其基本接线方式如图 1-1 所示。

前面讲过，在图 1-1 中静电电容器通过的电流，就是感应发电机的励磁电流。有了励磁电流静子电压便慢慢升起，直到稳定为止。

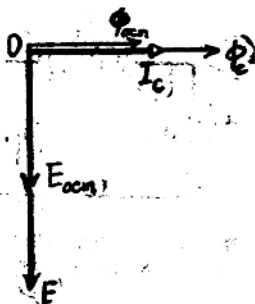
静子电压是怎样建立起来的呢？

我们知道感应电动机的转子铁心有剩磁，它产生一个剩磁通 Φ_{ocm} 如图 1-2 所示。

当转子旋转后剩磁通 Φ_{ocm} 割切定子线圈，而在定子上产生感应电势 E_{ocm} ，同时 E_{ocm} 比 Φ_{ocm} 滞后 90° ；由电势 E_{ocm} 在

并联的静电电容器中产生电容电流 I_c ， I_c 比感应电势 E_{ocm} 超前 90° ，这种电容电流在电机中产生的磁通 Φ_c 与 Φ_{ocm} 同向，因而使电势 E_{ocm} 继续增长，直至稳定。稳定电势数值的大小，决定于感应发电机本身的电感和外加电容。

电容电流的作用除了直接供给空载励磁电流外，还满足负荷电流的需要。



1-3. 空载自激情况

图 1-2 自激原理图

根据美国电机工程学会会刊 1939 年 2 月 C. F. 瓦格那所著“电动机的自激磁”（C. F. Wagner 著 Self-Excitation of motors）一文翻译如下：

电动机规范：容量 15 马力 三相 60 周 220 伏
1,770 转/分 CS 型 西屋公司造

电动机参数： $r_1 = 0.151 \Omega$ （每相至中性点）；

$r_2 = 0.145 \Omega$ （每相至中性点）；

$x = 0.394 \Omega$ （每相至中性点）；

$x_m =$ 激磁阻抗 $= 19.8 \Omega$ （每相至中性点）。

感应电动机之等值线路一般习见者如图 1-3，1-4 所示。

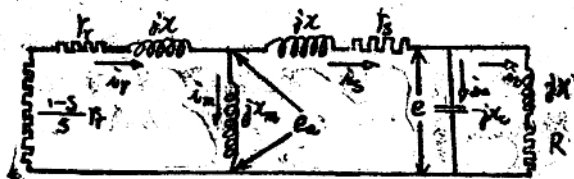


图 1-3 感应电动机之等值线路图

在图1-3中感应电动机作为发电机运行之条件除S必须为负值外，尚有以下两点：

1. 全电路中（如有负荷，则包括负荷在内）全部无功伏安数之和为零（决定电容器大小，见图1-3）。
2. 全电路中全部有功功率之和为零（决定带动机械之出力，见图1-3）。

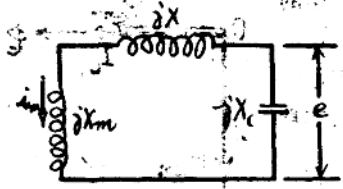


图 1-4 感应电机简化等值线路图
S—滑差；j—算子。

利用以上条件和等值线路图进行计算分析，与实测结果颇为一致，故感应电动机作为发电机运行时，其特性可以事先估计。因为需要考虑电动机之饱和特性，计算起来颇为不易，但可以说明引用此方法之正确性。

为了确能对感应发电机之有效控制，应首先取得电机磁化曲线或无载饱和曲线；此在感应电机出厂时，或在电气试验室中均能测得，作成曲线图备用。

当感应电动机出线，并联有三相静电电容器时，用原动机拖动转子，转至额定频率之同步转速，由图1-3看出，代表能量输入的 $\frac{1-S}{S} r$ ，因S接近于零， $\frac{1-S}{S} r$ 接近于无限大， i 亦几乎等于零，因此时为空载，能量输入仅为机组之一部分损耗，此值极小，因此图1-3可简化为图1-4。又因S甚小，静子电流频率几乎是同步频率， r 与 X_c 相较亦可省略，使原动机之转速恒定。调节静电电容器之电容，对于每一个电容器电流，有一个电压 e ，连接此各款即成为感应发电机在无载时的磁化特性曲线。如图1-5所示。

由于静电电容器易于控制，图1-5已扩展至正常激磁电流

10倍以上，靜子端电压則达額定电压之 2 倍。

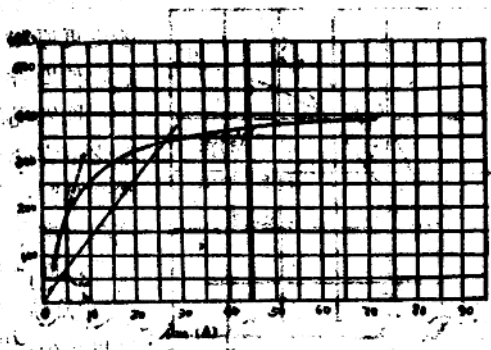


图 1-5 磁化曲线

参照图 1-4 由上述条件 1 看出： X_c 必须等于 $X + X_m$ 等于 $\frac{c}{i_m}$ 之比值，在图 1-5 曲线上任一点与原点 0 连接之斜率即指明了要产生该点之电压所需跨接的静电电容器容抗之数值。又从图 1-5 研究，当容抗渐渐增大时（即电容器电容渐渐减少时），连线之倾斜角 α 增大，而静子端电压减小，最后至与空气隙线（图中虚线所示）重合时，电压即不稳定，电容再减小，电机就不能产生电压，不能自激。故对于感应发电机之自激，有一最低限度的电容量，称为临界电容量。此与一般并激直流发电机之磁化特性颇为相似。

此外，据一台 50 周波，220/380 伏，7.5 瓩，1440 转/分的感应电动机空载与阻抗特性的试验如图 1-6 所示。

如上所述，若 $\alpha > \alpha_1$ ，即不能建立电压，当 $\alpha_c = \alpha_1$ 时的电容量即称临界电容量。

以上是在維持电机之轉速不變的情況下，即發出的頻率不變之下如此。如進一步變更原動機之轉速，便發生頻率變動，則發現在同一激磁之電容電流下當頻率增高時，靜子電壓亦相應增高；在另一方面，同一電容在頻率更高時，阻抗數值反更減小，即發電機建立之穩定電壓增高。如圖 1-7 所示。

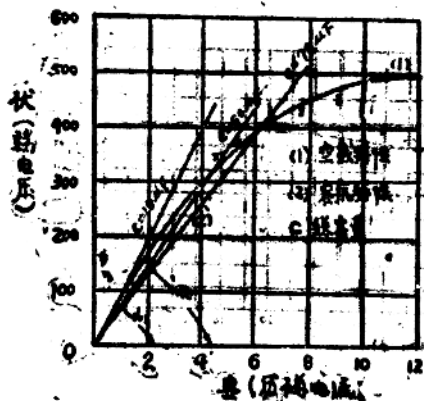


圖 1-6 空載特性曲綫

α_0 —容抗直綫的傾斜角；

α_1 —空載特性曲綫直綫部的傾斜角。

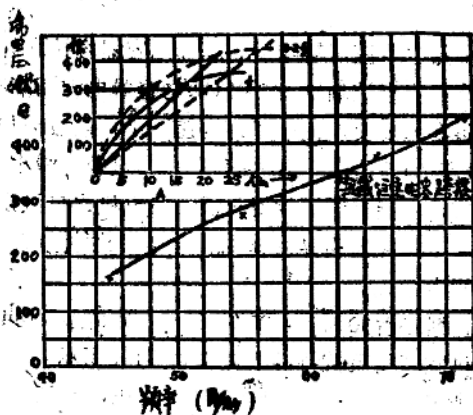


圖 1-7 $i_m = \text{常數}$ 時， $U = f(\omega)$

1-4. 負載調整特性

同上依據 15 馬力，220 伏，3 相，60 周波之電動機試驗結果。

A. 三相平衡負荷 當感應發電機靜子接有可調的三相平衡負荷(如圖 1-3 所示 $R+jX$) 時，保持並接之電容器容量及頻率不變，試得靜子電壓與負荷電流之關係如圖 1-8 所示。

此感應發電機之負載特性亦可根據等值電路圖(圖 1-3) 及一般條件：全電路中無功伏安數之和為零，及有功功率之和為零，進行計算分析結果與圖 1-8 之曲線吻合。

由曲線形狀比較，負荷中如有感抗(圖中所示 X 占 8.3%) 可使調整大為變劣。在一定電容器容量之下，限制了發電機之出力；但並不能因此說感應發電機不能供給感抗負荷。不過在負荷之功率因數較壞時，應

適當增加電容器之容量，以便得到額定電壓之穩定運行。圖 1-8 中曲線下部，近似直線部分(虛線所示)，表示在滯負荷時磁化曲線之空氣隙部分。實際上不可能在此部分運行，因不能得到穩定之電壓。但此部分指示了當負荷之 R 繼續減小時，感應發電機將失去電壓不能自激運行，故感應發電機不能供給

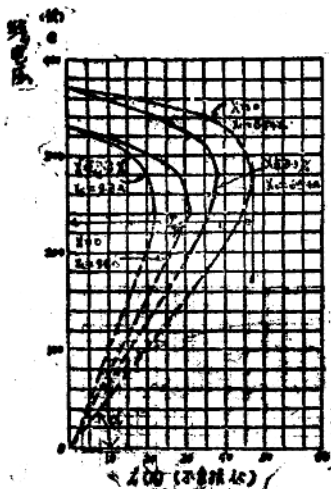


圖 1-8 負載調整特性

穩定之短路电流。

从图1-8中可以看出：当負荷电流增加时，端电压下降较大，电流繼續增加至一定值时，如再增加負荷，电流不但不会增加，反而下降。此时負荷电阻 $R = \tan \alpha / \sqrt{3}$ ，端电压此时已不稳定，直到电压、电流皆下降为零。此与并激直流发电机負荷特性完全相似，所以说感应发电机不怕短路是一个很大的优点。

B. 單相負荷 当感应发电机三相均并接有 $X_C = 10.3\Omega$ 之电容器，供給單相負荷 $R + jX$ 时，其中 X 占8.3%，負荷联在 b, c 綫上， a 綫上无負荷，保持电容器容量及频率不变，电压与負荷电流 i 之关系如图1-9所示。此种情况可以应用对称分量法，分成正序及負序之串聯網絡，并假定饱和情形仅影响正序網絡，进行分析运算結果与图1-9曲綫相吻合。

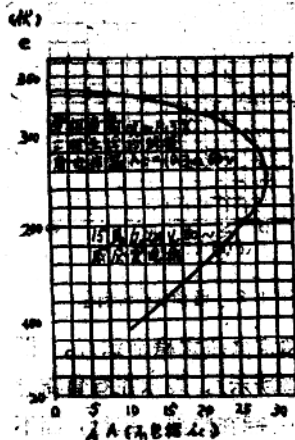


图1-9 單相負荷調整特性

綜上所述：感应电动机并接有事先算定容量之静电电容器时，可以通过自激而作为发电机运行。無論負載为三相平衡負荷或为單相負荷，为純阻抗或为感抗，甚至供給其他之感应电动机，均无不可。惟需要注意的是：在功率因數較坏时，应有足够容量之电容器并接。因为在負荷情况下，电容器之超前电流除满足激磁电流之需要外，尚应满足負荷方面感抗伏安（如电动机之漏抗等）之需要。

1-5. 轉速不变时电容与电压的关系

根据一台名牌为：T52-4，三相，50周波/秒，电压220/380伏接綫法 Δ/Y ，額定功率7.5瓦，額定电流26.5/15.3安轉速1440轉/分的感应发电机試驗結果：当 $n = \text{常数}$ 时 $U = f(C)$ 的关系曲线如图1-10所示。

从上所述之空载特性曲线可以求出电容与电压的关系曲线。在图1-10中可見：三相总电容为61微法时电压只有6.5伏，电容为66微法时电压急剧上升至334伏，电容在61~66微法范围内，电压是突变的。因此，电容的数值不能小于66微法，否则电压即不稳定。

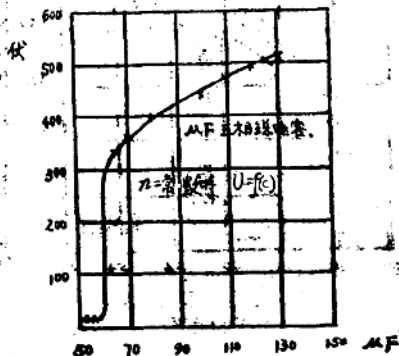


图1-10 $n = \text{常数}$ 时电容与电压关系曲线

1-6. 电容不变时转速与电压的关系

图1-11曲线仍系上述7.5瓦感应发电机試驗所得。

图中曲线(a)说明电压随周率上升的过程中，当周率 f 小于50周/秒时，发电机端电压很小，当电压接近50周/秒时，电压上升很快。因为当周率低于49周时，由电容器数值决定的傾斜角 α_c 大于該轉速条件下空载特性曲线的直綫部分傾斜角 α ，所以电压无法建立起来。周率再升高空载特性曲线也随着升高，当 $\alpha_c < \alpha$ 时电压即迅速升高。曲线(b)说明周率从50周逐渐下降时，电压下降較慢。这是由于磁滯效应所致。必須措

出，不同的电容数值电压刚烈上升的起始周率也是不同的；电容数值愈大起始周率愈小。

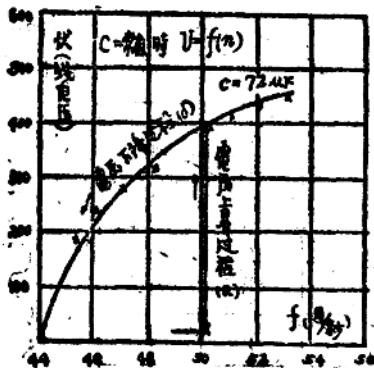


图 1-11 电容不变时转速与电压的关系

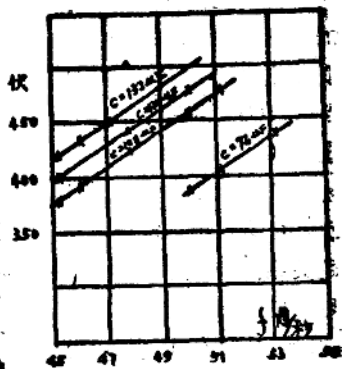


图 1-12 电容不变时周率与电压的关系

在一定周率范围内，周率与电压近似成直线关系如图 1-12。

不过电压升高的百分比要大些，例如周率变化 2% 电压变化了 7.7%，因为当周率上升时，空载曲线相应上升而使电压升高，另一方面周率上升时电容电流增加（相当于电容量增加），因而也引起电压升高。如周率继续上升很高电压与周率将不再是直线关系，而系空载特性曲线一样渐趋饱和。

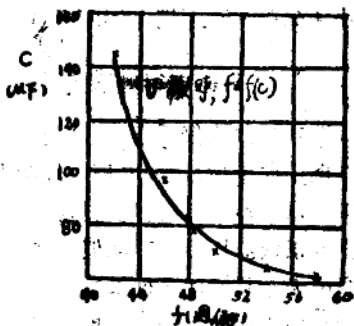


图 1-13 周率与电容关系曲线

1-7. 电压不变时电容与周率的关系

图1-13曲线表明了：在低周率范围内周率变化时所引起的电容量的变化，比在高周率范围内要大。因为在低周率情况下，额定电压是在空载曲线更为饱和部分，因而要达到额定电压，需要的电容数值增加很多。

第二章 电 容 器

静电电容器是感应发电机在自激过程中，不可缺少的组成部分。电容器的结构原理和运行特性，在电工学或专门书籍中有详细介绍，这里只讲一些电容器在使用中的若干问题，如容量的选择，接线方式和调整等。因为所有这些都与感应发电机的运行密切相关。现分别叙述如下。

2-1. 电容量的确定

(甲)用计算方法确定感应发电机需要的电容量感应发电机的简化等值线路图，如图2-1所示。

若静子电压为 U ，则得：

$$I_m(X_m + X_l) = I_m X_c \quad (1)$$

式中 I_m ——励磁电流即发电机在空载时静子电流的无功分量。

X_m ——激磁电抗

X_l ——漏磁电抗

由(1)式得电容器的电抗为：

$$X_c = X_m + X_l \quad (2)$$

由上式可以求出自激磁电容器的电容量。但需要先测出 X_m , X_n , 而 X_n 又为一个变数, 所以(2)式用起来是有困难的。因此实用上可采取下法, 也可以求出合乎要求的近似值:

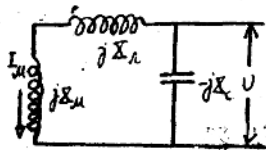


图 2-1 感应发电机等值线路图

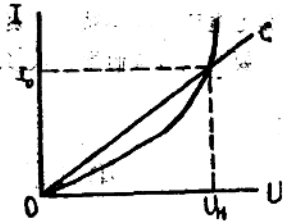


图 2-2 感应发电机的空载特性

設感应发电机之空载曲线如图 2-2 所示。图中空载电流 I_0 可以分成两个分量: 一个是有功分量, 用来产生机械转矩, 克服电机旋转时空气和轴承的摩擦与铁损; 另一个是无功分量 I_m 用来产生一个旋转磁场, 即产生一反电势。若能求得 X_m 的数值, 依下列近似公式即可很容易的计算出自激磁电容器所需的电容量:

$$C = \frac{I_m}{2\pi f U_n} \quad (3)$$

式中 U_n ——发电机的额定电压(伏);

f ——频率(周波/秒)。

在求出励磁电流 I_m 后, 就可算出励磁电容器的电容量。 I_m 的求得, 可根据无载电流 I_0 和无载时的功率因数 $\cos\varphi_0$ 。就可以算出 I_m 。

$$I_m = I_0 \sqrt{1 - \cos^2\varphi_0} \quad (4)$$

如果无功率因数表求不出 $\cos\varphi_0$, 可取 $\cos\varphi_0 = 0.1 \sim 0.2$ 来

近似的計算。

为了减少激磁用电容器的容量，在三相电机中电容器接成三角形。这种結綫需要三組电容器，每組电容器根据公式(3)可推算出电容器的容量：

$$C = \frac{I_m}{2\pi\sqrt{3}fU_{mN}} \times 10^6 \text{ (微法)}, \quad (5)$$

式中 I_m ——激磁电流的无功分量(安)；

U_{mN} ——感应发电机的額定綫电压(伏)。

經驗指出：电容器容量的选择，实际应用时应比公式(5)算出的数值大 10~15%，以便在滿負荷时电机端电压不致降得太低，影响电机出力。

(乙)用試驗方法求得感应发电机所需配置的电容容量。

根据全苏农业机械化 and 电气化研究所所作的各种感应电动机当发电机运转所需配置电容容量列于下表。表中所列的是三相的总电容。无功功率是按下列公式計算出的：

$$Q = 0.314 U_{mN}^2 C 10^{-6}$$

式中 Q ——电容器的无功功率，以无效千伏安計；

C ——照三角形接法連接的电容器的三相总电容以微法計。

380伏，750~1500轉/分的感应发电机在額定轉数时励磁所需的电容器三相总电容数值表(見表2-1)。

当感应发电机轉速恆定时，如若增加負荷，特别是感性負荷，要維持靜子电压不变，就必须增加电容器的电容量。

2-2. 电容器的連接方式

(甲)兩种接法的比較