

用感应电动机发电

修 訂 本

水利电力部技术改进局編著

水利电力出版社

著者的話

在“用感应电动机发电”的初版本里，我們提到待收集到多地运行經驗以后加以补充和修改，最近我水利电力部农村电气化工作小組在全国进行了解以后已經回来，他們提出了很多有关运行的經驗和問題，我們吸取了这些經驗，同时对各項問題进行了研究和試驗，获得了一些結果。这里把它們一併編写在这本小冊子里。

这本小冊子是重版了，对初版本作了重大的修改，而且在內容上也的确充实了不少，但是可以肯定，在大跃进的形势下羣众的智慧和創造性是无穷的，我們准备着随时再进一步充实这本小冊子。

为了迎接全国工业交通展覽会的开幕，在編写过程中多少有赶時間現象，如有錯誤的地方希望讀者指正。

水利电力部技术改进局

目 录

前言.....	3
一、基本原理.....	5
二、感应发电机的特性.....	5
三、电容量的计算及电容器的选择.....	11
四、感应发电机的运行及维护.....	13
五、经济比较.....	23

前 言

随着农业生产的大跃进和技术革新的广泛开展，农村愈来愈需要电力(包括动力和照明)，以提高劳动生产率。从大跃进以来几瓦至几十瓦的小型电站在农村中已经遍地开花地建设起来，这些电站的发电机选择，具有很大的经济和实用意义。这本小册子主要介绍用感应电动机发电的基本原理和运行情况。

发电机基本上可以分成二种，一种是同步发电机，它的转速和所产生的电动势的週波是同步的，也就是 $n = f \times 60 / \frac{p}{2}$ ，式中 n 为转速， f 为週波， p 为极数。另外一种就是感应发电机，它的转速略高于同步转速，它的转差率 s 随着负荷的增加而增大。

感应发电机本身实际上就是最广泛采用的感应电动机，不过它是用原动机驱动使其吸收机械能发出电能。感应发电机依照激磁方式的不同，可分成二种：一种是与电网并列，由电网供给激磁电流，称为他激感应发电机；另一种是在其静子线卷上并连一组电容器供给激磁电流，称为自激感应发电机，如图 1a。

用感应发电机代替小容量同步发电机有很多优点：

1. 鼠籠式感应电机的構造簡單、坚固，运行可靠，它不怕过速度运行及不平衡负荷运行。
2. 无励磁机及轉子滑环等，因而运行维护簡單，适合于农村使用。
3. 不怕短路，当短路时产生消磁作用而使电压迅速降低

至零，所以不要过流保护。

4. 在 20 瓩 以下的感应发电机(包括自激所需的电容器)较同容量的同步发电机价格便宜。

5. 小容量电动机较同步发电机易于制造，供应比较正常，适宜于当前农村电力发展的需要。而且将来农村电气化完成以后，这些小型感应发电机可以恢复作为电动机使用，而电容器也可以用来改善功率因数。

6. 如与电网并列运行时，并列简单，且不需要整步设备。

自激感应发电机的运行在苏联已经有了比较成熟的经验，在我国也已在很多地方获得了成功的运用。经验指出只要正确的选择电容量及接线方式，容量不超过 20 瓩的电站采用自激感应发电机是经济合适的。在有农村电网的地区感应发电机仍有重大的意义，因为这运行费用低而管理方便。根据日本的经验与电网连接的出力在 300 瓩以下的小型水电站以采用感应发电机为宜，只有在要求当电网停电后仍然能单独送电的电站才考虑采用同步发电机。

这本小册子讨论了自激感应发电机的特性和运行，并简称为感应发电机。

在农村中由于检修及购买设备比较困难，所以在选用设备时应力求可靠耐用。

在供应方面，目前重庆交电公司组织整套供应感应发电机设备(包括电容器，配电盘等)是很好的经验，这将大大的推动农村电站的建设。我们希望其他地方的交电公司能够吸取重庆的经验加以推广。

在送电方面农村中广泛的采用以铁线代替铜线，但是在目前供应铁线的规范太少，特别是铁绞线，希望有关部门能组织供应以满足农村电气化的要求。

一、基本原理

如果感应电动机转子上有剩磁存在，当转动时切割静子绕组感应一电势 E_{ocm} ，该电势作用在电容器上产生一超前 90° 的电容电流 I_c ，这个电流产生的磁通与剩磁 Φ_{ocm} 同相，如图1之6。剩磁 电容电流所产生的磁通相加起来使静子上感应的电势加大，如图2电势 E_{ocm} 在电容器上产生电流 I_{ocm} ，电容电流 I_{ocm} 使电势由 E_{ocm} 增加到 E_1 ，电势 E_1 又使电容电流增加到 I_{c1} ，如此反复循环直到电机空载曲线 $V_1 = f(I)$ 与容抗直线 $V_c = f(I_c)$ 相交为止(如图2的A点)。最终稳定的电压大小决定于电容器的数值和原动机的转速。

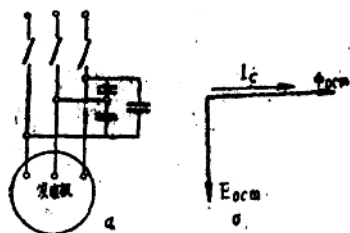


图1 自激异步发电机

a) 异步发电机接线图；b) 自激的向量图。

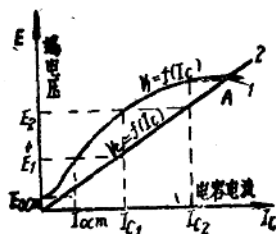


图2

1—电动机空载曲线；
2—容抗直线。

二、感应发电机的特性

根据7.5 瓩三相鼠笼电动机所作试验结果，综述分析感应发电机的特性如下：

1. 空載特性

保持发电机額定轉速不变，改变电容的数值得到不同的电
电动机的銘牌数据

型式T52-4 三相50周/秒

电压220/380伏 接綫法 Δ/Y

額定功率7.5瓩 額定电流26.5/15.3

轉速1.440轉/分

压，將电容电流对应的电压值各点連接起来，就是該发电机的
空載特性曲綫(見圖3)。从曲綫中知道电容电流(即励磁电流)
为零时，感应电势并不为零，而为1.4伏，这个电势就是由轉
子剩磁产生的。一般說来感应电动机都有剩磁，这是电动机改
为发电机运行的必要条件。

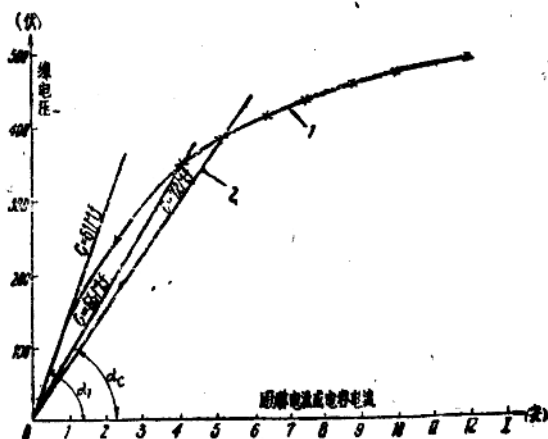


圖3

1—空載特性曲綫；2—容抗特性；c— Δ 接綫方式的三相总电容。

电容数值愈大,容抗直綫①的傾斜角度 α 愈小,从图上可以看出空載电压也愈高,反之电压則愈低周率升高时空載曲綫也相应的上升, α_1 增加,同时周率上升使电容电流增加,即 α_c 减小,因此使电压上升,反之則下降。欲使发电机稳定工作,必須使 $\alpha_c < \alpha_1$ (见图3)即必須具有最小电容量,否則,如 $\alpha_c > \alpha_1$,即不能建立电压。当 $\alpha_c = \alpha_1$ 时的电容量称为临界电容量。

以上 α_c 为容抗直綫的傾斜角

α_1 为空載特性曲綫直綫部分的傾斜角。

2. 轉速不变时电容与电压的关系

从空載特性曲綫中可以求出电容与电压的关系曲綫 (如图4), 从曲綫可見三相总电容低于60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30~66微法之間約一个数值时 (即在临界电容量, 由于試驗时不能調节得很細, 无法得到精确数值) 电压是突变的, 因此电容的数值不能小于66微法 (約数), 否則电压即不稳定。

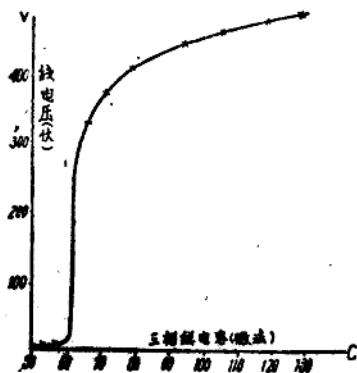


图4 电容与电压关系曲綫
(轉速为額定值)

3. 电容量不变 时轉速与电压的关系

图5 曲綫a說明电压

① 对于电容器來說当周率不变时加在它上面电压和电流成直綫关系, 所以称为容抗直綫。

随周率上升的过程中，电容量为 72 微法时，周率小于 50 週/秒时，发电机端电压很小，当周率接近 50 週/秒时，电压上升很快，因为当週率低于 49 周时，由电容数值决定的倾斜角 α_c 大于该转速条件下空载特性曲线的直线部分倾斜角 α_1 ，所以电压无法建立起来，周率再升高，

$\alpha_c > \alpha_1$ ，电压即迅速升高。曲线 δ 说明周率从 50 週逐渐下降时，电压下降较慢。这是由磁滞效应所致。必须指出，不同的电容数值，电压剧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。

在一定周率范围内，周率与电压近似成直线关系如图 6，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%。如周率变化较大，电压与周率将不再是直线关系而象空载特性曲线一样渐渐饱和。

周率对于电压的影响很敏感，运行中应加注意，以免发生过高的

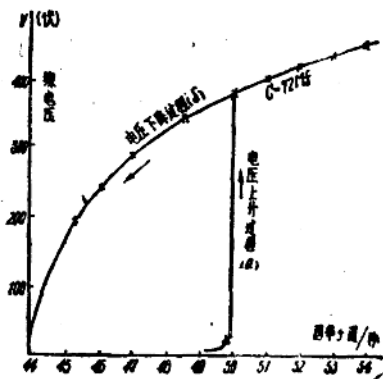


图 5

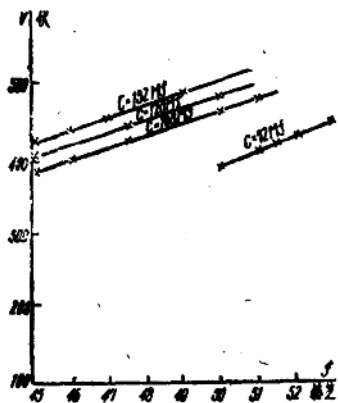


图 6 电容数值不变时周率与电压关系曲线

电压损坏设备(如电灯泡)。据我們了解,有些地方就是因轉速不够而发不出电,也有当轉速已接近临界值,操作人員認為电压还没有建立,而仍大量增加轉速,造成过电压,所以在接近額定轉速时轉速应慢慢上升。

4. 电压不变, 电容与周率的关系

图7曲线表明如額保持电压不变电容与週率的关系曲线。週率愈高,所需的电容就愈少。如不考虑饱和效应电容将与週率的平方成反比,实际上因为饱和的影响使週率升高时所能节省的电容器要小些。

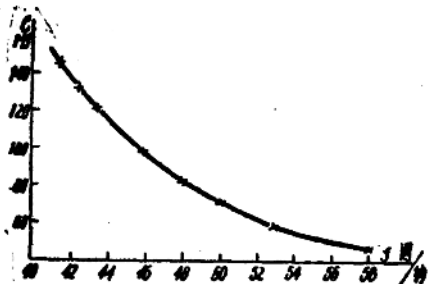


图7 周率与电容关系曲线

5. 三相負荷特性

負荷特性是指发电机电压和負荷的关系,今以一台容量为15馬力的感应发电机的負荷特性为例,說明如下:从图8可見当負荷电流增加,端电压下降的幅度是比較大的,負荷电流增加到临界值 I_{kp} 时(此时的負荷电阻 $R = \tan \alpha / \sqrt{3}$),如果再繼續增加負荷,电流不但不增加反而减少,端电压在这个时候已失去稳定,并繼續降低,直到端电压及負荷电流均降至零为

止。这与并激直流发电机
负荷特性完全相似。

电动机负荷对感应发
电机端电压的影响比照明
负荷对端电压影响严重得
多，这主要是因为电动机
也要吸收该发电机的一部
分电容电流，这样一来，
发电机所能担负的出力在
一定的电容数值下受到了
限制。特别是电动机在起
动时需要大量的电流，往
往使发电机电压不能提高
而垮台。

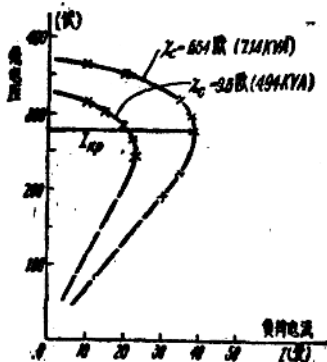


图8 负荷特性(负荷中 X_L 占8.3%)

6. 三相短路及不对称短路

按照发电机的负荷特性，当负荷电阻小于 $\tan \alpha / \sqrt{3}$ 时，发电机电压将下降直至垮台，这种情况也运用于发电机的三相短路，所以感应发电机的三相短路特性是发电机电压急速消失，不会引起巨大的短路电流，这是感应发电机运行上的一大特点，对简化继电保护接线有着决定性作用。

在1.62千伏安，380/220伏2.45/4.52安鼠笼式感应发电机上进行不对称短路试验，试验指出：无论发电机为 Δ 或者Y接线，是相间短路还是单相对中性点短路，稳定短路电流均为零。以Y接单相对中性点短路为例说明如下：

接线图如图9。空载时电压为412伏，当负荷电阻 R 逐渐减少时，负荷电流逐渐增加直到负荷电流为2.75安时三相电压

为: $U_a=185$ 伏, $U_b=217$ 伏, $U_c=210$ 伏, 负荷再增加, 电流电压均迅速下降至零, 这是因为当 a 相短路时, a 相绕组相当于一短路绕组, 它产生去磁效应, 使电压崩溃, 所以感应发电机不需要任何短路保护。

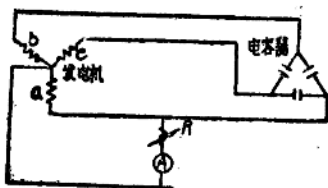


图9 单相短路接线图电容器
电容量为 3×7.5 微法

三、电容量的计算及电容器的选择

1. 电容量的计算

选择电容器的电容量时, 应保证感应发电机的额定电压及电流与原铭牌相同。现将苏联出品的或仿苏型的 380 伏异步发电机所需电容数值列于下表, 图10曲线是为了便于查得中间容量感应发电机所需电容值而作的。

如果电机铭牌上有空载电流值, 或在购买时能够测得空载电流的话, 所需电容值可按下述方法计算:

(1) 空载时所需电容值(三相总电容)

$$C_1 = \frac{\sqrt{3} I_n}{314 U_n} \times 10^6 \text{ 微法}$$

式中 I_n 为空载电流;
 U_n 为额定线电压。

(2) 纯电阻负荷(照明)满载时所需电容值约需增加 C_1 的 25%。

(3) 如总负载功率因数估计为 0.8, 则满载时所需电容量, 要补偿负载的无功部分。所增加的无功容量 Q (千伏安) $= 0.6 \times$ 发电机容量 (千伏安)。

380伏, 750~1500轉/分的感应发电机在額定轉数时

勵磁所需的电容器三相总电容值

发电机 容量 (千伏安)	空 載		滿 載			
			功率因数为1		功率因数为0.8	
	电 容 (微法)	无功功率 (千伏安)	电 容 (微法)	无功功率 (千伏安)	电 容 (微法)	无功功率 (千伏安)
1.0	16.0	0.73	20.5	0.93	32.0	1.45
1.5	22.5	1.04	28.5	1.29	46.5	2.11
2.0	28.0	1.27	36.0	1.63	60.0	2.72
2.5	34.0	1.54	43.0	1.95	74.0	3.34
3.0	40.0	1.81	48.0	2.18	87.0	3.94
3.5	45.0	2.04	56.0	2.54	100.0	4.53
4.0	50.0	2.26	62.0	2.81	112.0	5.08
4.5	54.0	2.44	70.0	3.18	124.0	5.62
5	60.0	2.72	75.0	3.40	138.0	6.25
6	69.0	3.14	87.0	3.94	159.0	7.21
7	74.0	3.36	98.0	4.44	182.0	8.25
8	80.0	3.62	108.0	4.90	204.0	9.25
10	92.0	4.18	130.0	5.90	245.0	11.10
12	102.0	4.62	144.0	6.53	282.0	12.80
15	120.0	5.44	172.0	7.80	342.0	15.50

(式中 $0.6 = \sqrt{1-0.8^2}$ 。0.8为估計功率因数值)

$$C_2 = \frac{Q}{314 \times U_n^2} \times 10^3 \text{ 微法}$$

額定輸出时总电容 $C = 1.25C_1 + C_2$ 。

有些資料認為电动机負荷不能超过20%，这可能是保守了些，根据我們試驗实际上只要配以足够的电容器，即使电动机負荷佔总負荷的大多数也可以正常发电。

为了电容器损坏后能及时更換应根据当地供应条件配备一

定数量的备用电容器。

2. 电容器的选择

根据发电机电压的不同所选取的电容器规格亦不相同。

如发电机电压为 380 伏, 电容器为 Δ 接线时, 最好采用 380 伏交流电容器, 或者采用 1600 伏 ~ 1500 伏的直流纸质电容器, 电容器为 Y 接线或发电机电压为 220 伏时, 则可用 220 伏日光灯电容器, 或 600 伏纸质直流电容器。

按照 $\sqrt{2}U_n$ 来选用直流电容器是不合适的,

因为这样将由于介质损失发热而使电容器很快损坏, 这给运行增加了许多困难。

电容器应尽可能采取 Δ 接线。当电容器和发电机均为 Y 接线时, 电容量不应引出中线和发电机中线连接, 这样可使负荷不平衡时电压的不平衡较少。

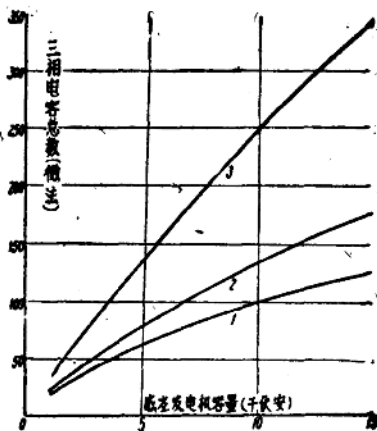


图 10 发电机容量与电容值关系曲线

1—在额定转速时, 空载条件发电机容量与电容的关系; 2—在额定转速时, 满载功率因数为 1 时发电机容量与电容的关系; 3—在额定转速时, 满载功率因数为 0.8 时发电机容量与电容的关系。

四、感应发电机的运行及维护

1. 接线方式及电压调整

运行中切除负荷时, 会出现电压过高的现象, 这一方面是

由于原动机轉速升高，另一方面是由于沒有切除多余的电容器，使发电机过励磁，特别是在切除电动机負荷的时候，影响較大，根据上述产生过电压的原因介紹几种簡便的防止方法：

(1) 切除負荷时(特别是电动机負荷)，与电站运行人員联系，以便运行人員注意調整电压。这种办法对于电动机負荷距离电站較近，联系很方便的时候是可以的。其調压方法的接綫如图11所示，

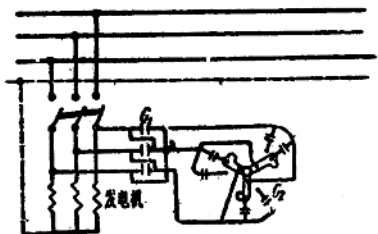


图 11

(2) 切除負荷时同时切除电容。其接綫方式如图12所示，

在每一路負荷的饋电綫上并联一組电容，电容的数值应足以补偿該路負荷所引起的电压降，在切除負荷时，电容也同时被切除，这样电压就不会发生很大变动。供給空載励磁

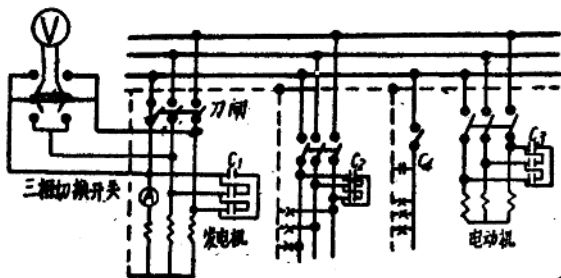


图 12

(注) C_3 在电动机处， C_2 及 C_4 接在电站内电板上。

所需的电容接在发电机引出綫上。

(3) 調节原动机的轉速，以保持电压不变，由图 6 曲綫可見轉速对电压的影响是很大的，当負荷从空載加到滿載时周率約須增加 10% 左右。

(4) 綜合方法(2)和(3)，用并联电容器与电动机組成一个單元以补偿无功容量。由調节原动机轉速来补偿有功功率，因为当有功功率变化时总是要調节原动机輸入的。

上述的四种方法，第一法操作最麻煩，第三法要由电站供給无功也是不合适的，第二法和第四法可以根据原动机速度調节情况选择。

2. 負荷不平衡时的运行情况

經变压器送电的“兩相一地”制輸电方式，对发电机的不平衡是比較小的。但是对于直接送电的发电机來說，由于綫路的分布及單相用戶的不均衡則不平衡度較大。这种不平衡电流对于同步发电机是危险的，但对于鼠籠式感应发电机來說影响就比較小，因为在它的轉子上沒有繞組，即使温度稍高一点也不会产生严重的后果。我們在上述 1.62 千伏安发电机上做了試驗，接綫方式如图 13。

單相負荷时每相电容为 14 微法，負荷电流为 2.1 安，負荷相电流为 2.9 安，三相电压 $U_{ao} = 244$ 伏， $U_{bo} = 217$ 伏， $U_{co} = 230$ 伏，試驗結果靜子鉄温昇为 26.2°C 。当相电流为 2.52 安时連續运行三小时后停机取出轉子作詳細的檢查，并

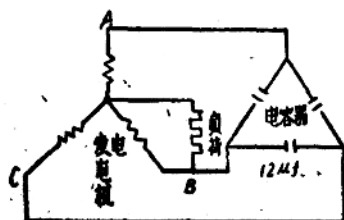


图 13 單相負荷試驗接綫图

未发现有 overheating 的迹象。

試驗証明鼠籠式感应电机可以載較大的不平衡負載，因此允許直接采用“兩相一地”輸電方式，但是在分配負荷時亦應盡量使三相均衡，以減少轉子損失。

3. 运行电压的选择及允許偏差

低压感应电机电压一般是 Y/ Δ 380/200 伏的，也有 Y/ Δ 200/127 伏的，如果采用直接配電的話以 380 伏 Y 接綫为宜，因为电压高一些可以减少綫損。

为了补偿一部分綫路損失，发电机的电压可以提高 10%，也就是額定电压为 380 伏时提高到 420 伏运行，这对电机来說是沒有什麼危險的，按照农村照明的要求用戶处电压应不小于額定电压的 10%，也就是不小于 340 伏（相电压不小于 198 伏）。因为电灯泡的寿命和发光效率与电压的关系很大，可以用下式表示：

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^m$$

式中 m ，对于光亮 $m=3.5$ ；对于使用期限 $m=-13.5$ 。

如电压降低 10%，电灯的明亮度要降低 30%。但发电机电压亦不宜过高，不然的話电站附近电灯泡的寿命將大为减低，如电压升高 10%，寿命將减低 70%，也就是原来灯泡可以用 1000 小时，現在只能用 300 小时，为了弥补这个缺陷，可以在电站附近的电灯回路內串連一电阻，以降低电压。从上述可見更大的电压偏移是不合适的。

4. 額定出力和出力不足的原因

感应电动机用作发电机时的額定出力应以額定电压乘額定