

中央人民政府燃料工業部

義講班習講氣電

第一冊

中央人民政府燃料工業部
技術研究室編

燃料工業出版社

中央人民政府燃料工業部

義講班習講電氣

第一冊

中央人民政府燃料工業部
技術研究室編

燃料工業出版社

一九五二年九月·北京

電氣講習班講義
(第一冊)

書號：50·25開本·共107頁·定價：8,000元
一九五二年九月北京第一版 (1—7,000冊)

版權所有·不許翻印
校對：朱玉蓉 胡定國

中央人民政府燃料工業部
技術研究室編

燃料工業出版社出版
(北京東長安街台基廠北口)
新華書店總經售

編 者 的 話

一、本書是中央人民政府燃料工業部於一九五一年七月在北京開辦的電氣講習班第一期的講義提綱。這個班的教程和主講是蘇聯專家主持的；中國工程師配合着作些專題報告。參加學習的同學都是全國各電廠的工程人員和先進工人，共計六十餘人。

二、講義的內容主要是針對目前我國電廠和電力網中存在的常見發生而以往作得不够的技術問題。

三、本書原為講授形式的資料，在原講習班共講授約兩個半月，其中包括專題報告、學員提問題和專家解答問題的時間在內。這些資料的介紹方法對於具有一般文化的參加實際工作的技術人員和工人是切合實際需要並易於接受的。

四、這個講義經過整理以後，按照內容的類別分為五冊出版：

第一冊包括同期發電機運行和檢修工作中的問題；

第二冊包括過電壓、防雷保護設備、絕緣配合等問題；絕緣試驗方法也列入本冊裏；

第三冊包括電力系統的繼電保護裝置和自動裝置等在工作中應注意的問題；

第四冊包括發電設備的保護裝置在工作中應注意的問題；

第五冊包括短路電流的計算問題。

五、本書出版時仍保留了原來講義的形式，因此，各篇中敘述有關問題時，可能為引述的必要而發生重複的地方；每篇所用的專名詞未必盡同，雖盡量修正，或恐仍有遺漏；熱烈希望讀者發現問題時，函寄我室，以便幫助我們改正。

中央人民政府燃料工業部技術研究室

一九五二年五月

目 錄

同期發電機的運行方式	5
第一節 導 言	5
第二節 發電機在力率不合乎額定值時的運行	5
第三節 發電機在長時間電壓變動下的運行	8
第四節 發電機在長時間週率變動下的運行	12
第五節 兩種特性曲線	15
同期發電機的主要常數	18
第一節 短路時的物理現象	18
第二節 穩定性短路電流(不計算有效電阻)	23
第三節 瞬間電抗及次瞬間電抗	24
第四節 用恢復電壓方法求測同期發電機的常數	28
第五節 靜子散漏電抗	32
第六節 零序電抗及負序電抗	34
第七節 主軸及正交軸同期電抗的測定	35
第八節 同期電機電樞反應及電抗降下的測定	36
附 錄	37

同期發電機靜子的檢修	41
第一章 發電機活性鐵的毛病和事故	41
第一節 緒 言	41
第二節 鐵片中間電氣絕緣不良和它的破損	42
第二章 關於發電機靜子活性鐵修理的一些問題	51
第一節 一般注意事項	51
第二節 以重裝的方法修理活性鐵	52
第三節 活性鐵不經拆卸的修理	55
附錄：活性鐵溫度試驗方法	57
第三章 靜子線捲的故障	59
第一節 線捲的鬆弛	59
第二節 線捲絕緣老朽的外部特徵	62
第三節 絕緣老朽的間接特徵	69
第四節 靜子線捲不正常的高溫	72
第五節 鉚接點接觸不良	74
第六節 線捲絕緣的擊穿	76
第四章 關於修理發電機靜子的一些問題	82
第一節 一般注意事項	82
第二節 修理靜子線捲	82
第五章 靜子各構成部分內的洩漏磁束和渦流	90
第一節 由於主磁束的洩漏磁束而產生的渦流	90
第二節 主磁束的洩漏磁束	97
第三節 靜子線捲的洩漏磁束	98
附錄：（一）修理電機用的各種漆	102
（二）零件和導線鉚接用鉚條	106

同期發電機的運行方式

第一節 導 言

每個發電機都有製造工廠的銘牌，它上面一般的載有電機主要的額定數字：

(1) 額定電壓——容許變動範圍是 $\pm 5\%$ ；

(2) 額定電流——容許變動範圍是根據電壓的 $\pm 5\%$ 變動範圍而變動的；換句話說，也就是當電壓在 $+5\%$ 到 -5% 範圍內變動時，發電機的容量應不變；

(3) 力率(或稱電力因數) $\cos\varphi$ ——在感應象限中(即進相或滯相)，得出它的最低值；

(4) 轉數；

(5) 發電機轉子和勵磁機的額定電流；

(6) 發電機的容量。

實際上發電機有時是在不合乎銘牌規定的電壓、週率和電力因數的運轉方式下運轉着的，所以運轉人員須能估計發電機額定容許變動的極限和與此有關的發電機容量的必要的變動。因此，就要分析研究發電機各種運行方式。

第二節 發電機在力率不合乎額定值時的運行

汽輪發電機在力率($\cos\varphi$)不合乎額定值和其他不正常的情況下長時間運行時，應當遵守一個重要的規定，就是：電機活性鐵部分

的溫度，不應超過正常運行方式時的溫度。

如果冷却空氣的溫度和過波數不變時，活性鐵的溫度與磁束有關，也就是與電動勢有關。這時，線捲的溫度與靜子和轉子電流有關。所以當求電機容許負荷和力率間的關係時，我們應當根據電動勢不變和轉子電流不變兩個條件。

(1) 活性鐵溫度不變 —— 電動勢不變的條件

活性鐵的溫度可以用下列的公式來表示，它的溫度與靜子電流的變化是有關的，而靜子電流的變化是根據電壓和電流間的相位角而定。

$$t_{Fe} = t_e + \Delta t_{FeN} \left(0.65 \frac{1 + 2X_e \frac{I}{I_N} \sin\varphi + X_e^2 \left(\frac{I}{I_N} \right)^2}{1 + 2X_e \sin\varphi + X_e^2} + 0.35 \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \right) \quad (1)$$

式中 t_{Fe} —— 活性鐵實際溫度。

t_e —— 入口空氣溫度。

Δt_{FeN} —— 活性鐵額定溫昇（與損失成正比）。

X_e —— 靜子線捲端部洩漏電抗約為 0.06 及 0.1，以這一個公式在各種不同 $\sin\varphi$ 值時可求得 $\left(\frac{I}{I_N} \right)$ 的比值，結果如表一所示：

表 一

力 率 $\cos \varphi$	0	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$I/I_N, X_e=0.06$	0.944	0.95	0.955	0.96	0.97	0.98	0.99	1.0
$I/I_N, X_e=0.1$	0.912	0.948	0.953	0.958	0.968	0.98	0.99	1.0

由上表可知，當力率值降低時，在保持活性鐵溫度及 t_e 不變的條件下，靜子電流變動得很少。此外，活性鐵的溫昇總是有一些餘

量的；所以這種情況不可作為限制發電機出力的根據。

(2) 轉子電流不變的條件

負荷與力率的關係，根據總勵磁電流不變，可以按下面的公式

(2) 計算（參看第一圖）。

$$AW_f^2 = AW_e^2 \cos^2 \gamma + (AW_a + AW_e \sin \gamma)^2$$

式中 AW_f —— 勵磁安培匝的和。

AW_e —— 用於產生磁束的安培匝。

AW_a —— 補償電樞反作用的安培匝； $AW_a = AW_{aN} \frac{I}{I_N}$ 。

$$AW_f^2 = AW_e^2 + 2AW_e \cdot AW_{aN} \frac{I}{I_N} \sin \gamma + AW_{aN}^2 \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \dots (2)$$

由第一圖得 $\sin \gamma$ 之值：

$$\sin \gamma = \frac{\frac{I}{I_N} X_P + \sin \varphi}{\sqrt{(\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) + 2 \frac{I}{I_N} X_P \sin \varphi + \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 X_P^2}} ; \text{再}$$

以 AW_f^2 來除它。

最終得出很複雜的二次方程式，以這一個方程式當 φ 角有各種不同的值時求 $\frac{I}{I_N}$ 之比，得出以下數值：

$$\left(\frac{AW_e}{AW_f} \right)^2 + 2 \frac{AW_{aN}}{AW_f} \cdot \frac{AW_e}{AW_f} \cdot \frac{I}{I_N} \cdot \frac{\frac{I}{I_N} \sin \varphi}{\sqrt{1 + 2 \frac{I}{I_N} X_P \sin \varphi + \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 X_P^2}} + \left(\frac{AW_{aN}}{AW_f} \right)^2 \frac{I}{I_N} - 1 = 0$$

表 二

力率 $\cos\varphi$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$\frac{I}{I_N}$ (假定 $X_P = 0.15$) $\frac{AW_{aN}}{AW_f} = 0.6$									
	0.8	0.81	0.81	0.82	0.83	0.85	0.87	0.93	1

因此，當汽輪發電機運行而力率與額定值不同時，限制發電機的出力便與轉子電流及溫昇有關，當力率 = 0 時，限制出力約 20%。

第三節 發電機在長時間電壓變動下的運行

我們知道，發電機在電壓較額定電壓增減 5% 的範圍內長時間運行時，除了出力不能減低外，其他額定數字是可以變動的。電壓增高 5%，靜子電流就降低 5%；相反的，當電壓降低 5% 時，發電機電流就適當地增高。發電機常常是必須在電壓變動得很大的條件下運行的，所以下面將在各種電壓變動很大的情況下的發電機的運行分析一下。

一、在電壓高於額定值情況下發電機的運行

發電機在超過額定電壓情況下長時間運行時，應當注意以下數點：

(1) 轉子電流不得超過額定值。

(2) 活性鐵溫度不得超過容許值；且不得超過正常運行時的溫度的 8—10°C。

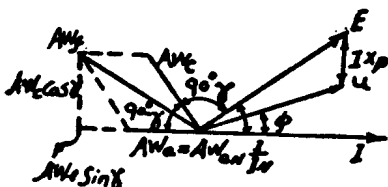
• 8 •

(3) 靜子線捲溫度不得超過容許標準。

(4) 漏散磁束的增多，應不致使發電機的實體部分(如端蓋)和支持線捲端部的金屬零件的內部溫度昇得特別高。

(5) 過電壓運行對靜子線捲介質強度應不致有危險。

爲分析這些問題，首先我們研究一下發電機保梯向量圖。該圖能表明發電機內部電動勢和勵磁安培匝相互間的關係。



第一圖 同期發電機保梯向量圖

圖中 u = 發電機端電壓；

X_p = 保梯電抗 (由靜子線捲漏散電抗和經過靜子腔漏散電抗所組成)； I = 靜子線捲電流；

AW_e = 轉子線捲勵磁安培匝 (使

發電機產生電動勢所必需的磁束)； AW_a = 補償電樞反應的勵磁線捲安培匝。如果 AW_{aN} 相當於靜子電流在額定數值時的電樞反應安培匝，那麼在任何電流時的電板反應安培匝都可按下面的公式計算：

$AW_a = AW_{aN} \frac{I}{I_N}$ ； 如果認爲發電機在過電壓運行時不應當將

轉子電流昇高到超過額定電流，從第一圖看，應當是：

$$AW_f^2 = AW_e^2 \cos^2 \gamma + (AW_a + AW_e \sin \gamma)^2；$$

以 φ 角表 $\sin \gamma$ 的值代入上式中：

$$\left(\frac{AW_e}{AW_f} \right)^2 + 2 \frac{AW_{aN}}{AW_f} \cdot \frac{I}{I_N} \cdot \frac{AW_e}{AW_f} \cdot$$

$$\frac{\frac{I}{I_N} X_p + \sin \varphi}{\sqrt{1 + 2 \frac{I}{I_N} X_p \sin \varphi + \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 X_p^2}} + \frac{AW_{aN}^2}{AW_f^2} \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 - 1 = 0$$

在上式中取 $\frac{\Delta W_{aN}}{\Delta W_f} = 0.6$ 至 0.7 (在各種不同的發電機內，它變動的範圍很小，約為 0.6 至 0.7 ，相當於短路比為 0.5 至 0.8)；保梯電抗亦然，是在 0.12 至 0.15 的很小範圍內變動，或低於 0.12 ，這種電抗並不因限制短路電流而降低。取 $\cos\varphi = 0.8$ ，並用標準的無負荷特性曲線，就可以求得由於電壓相對的增高與發電機靜子容許電流的關係。由同一向量圖看發電機電動勢應為：

$$E = \sqrt{u^2 \cos^2 \varphi + \left(u \sin \varphi + u X_p \frac{I}{I_N} \right)^2}, \text{ 或者以 } u \text{ 除之，得：}$$

$$\frac{E}{u} = \sqrt{\cos^2 \varphi + \left(\sin \varphi + X_p \frac{I}{I_N} \right)^2}$$

在各種不同的 $\frac{I}{I_N}$ 及一定值的 φ 和 X_p ，可以求出 $\left(\frac{E}{u}\right)$ 的比。

知道發電機的電動勢就很容易求得勵磁電流。結果計算如表三：

表 三

I	$\frac{I}{I_N}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	II	$\frac{I}{I_N}$	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	$\frac{AW_e}{AW_f}$	0.925	0.833	0.733	0.62	0.495		$\frac{AW_e}{AW_f}$	0.9	0.798	0.676	0.535	0.387
$\frac{AW_{aN}}{AW_f}=0.6$	$\frac{E}{u}$	1.01	1.025	1.045	1.061	1.075	$\frac{AW_{aN}}{AW_f}=0.7$	$\frac{E}{u}$	1.021	1.04	1.085	1.1	1.10
$X_p=0.12$	ie	2.17	1.95	1.77	1.45	1.16	$X_p=0.15$	ie	2.79	2.47	2.1	1.66	1.2
	$\frac{E}{u_N}$	1.36	1.32	1.26	1.18	1.075		$\frac{E}{u_N}$	1.43	1.39	1.34	1.25	1.10
	$\frac{u}{u_N}$	1.35	1.29	1.27	1.12	1.0		$\frac{u}{u_N}$	1.4	1.34	1.26	1.15	1.0

由表三可知，如果限制發電機靜子電流，發電機就可在過電壓條件下運行。但是活性鐵內磁束密度過大時，可能由於衝擊磁束和增長的洩漏磁束使轉子表面部分和靜子實體部分發熱，所以若不經過特殊試驗，在過電壓到達額定電壓的125—130%時是不能允許發電機長時間運行的。

而且，發電機在過電壓條件下運行時，因為靜子鐵內熱損失約與磁束密度的平方成正比，所以也會引起靜子鐵發生附加的熱。實際上隨着磁束的增長，鐵損特別增高；這種關係是由磁束密度的多次方（三次方、五次方）來確定的，這可以根據當活性鐵達到飽和狀態時漏散磁束激烈增加和靜子實體零件內的熱損失增高來說明。經驗證明：以活性鐵的溫昇觀點來說，發電機的電壓都可昇高10%。但為了更正確的求得溫昇情形，必須進行活性鐵的溫度測量。

二、發電機在電壓降低到超過5%的情況下運行時，會使發電機的出力降低。出力的降低是與電壓成正比；因為由於靜子線捲的溫昇，靜子電流不可能超過發電機正常電流的1.05倍。在特殊情況下，檢查靜子線捲溫昇以後，若靜子電流可能增大，發電機的出力可以不需降低。

第 四 節 發電機在長時間週率變動下的運行

發電機的週率增高是受着轉子機械強度的限制的，一般若是轉子沒有特殊設計和經過特殊試驗是不可以增高它的週率的。最常見的是在必要時降低週率長時間的運行。當降低發電機的週率數時，限制發電機出力的是以下各種因素所發生的作用：

(1) 降低了發電機的通風；因此，增大了線捲發熱部分與冷空氣的溫度差。我們知道，離心式通風機所造成的壓力是與轉數成正

比的。

(2) 當保持母線上的電壓為額定值，而靜子活性鐵的磁束和轉子電流增大時，則造成約與電流的平方成正比的額外溫昇，同時由於降低週率，活性鐵內的磁滯損與週率成正比的降低，活性鐵內的渦流損與週率的平方成正比的降低。因此可以說，週率降低，活性鐵內部損失的和，幾乎不增加。只是由於轉子電流的增大，轉子內部的損失增多。

(3) 降低空氣摩擦損失；空氣摩擦損失是與週率的三次方成比例。現代發電機的這種損失大約為30%。所以由於機械強度的條件，當減少轉數時，因為循環空氣量的減少，電機額外的溫昇並不大。發電機的週率變化不應超過5%，也就是52.5週率。轉子強度試驗，是以超過額定轉數的20%進行之。

(4) 當降低週率時大大減少了通風損失(約為全損失的30%)。表四是根據以下情況，當發電機週率變動時計算所得的空氣溫度昇高值。

1. 電機內部損失的半數與週率無關；
2. 空氣的正常過熱溫度採取為 25°C ；
3. 勵磁電流保證發電機負擔全負荷；

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_N} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + 1 \right) \frac{f_N}{f} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + \frac{f_N}{f} \right) \quad (\text{註1})$$

表 四

f	46	47	48	49	50	51	52
$\frac{\Delta t}{\Delta t_N}$	0.967	0.975	0.98	0.99	1	1.01	1.02
$\Delta t^{\circ}\text{C}$	24.2	24.4	24.5	24.8	25	25.2	28.5

4. 發電機負荷不變，週率數降下時，變動轉子電流。

表 五

f	40	45	48	50	55	60	
$\frac{\phi}{\phi_N}$	1.23	1.1	1.035	1	0.915	0.845	與週波 成反比
$\epsilon = \frac{\Delta W_e}{\Delta W_N}$	1.83	1.26	1.08	1	0.835	0.715	

因此，當週率降下時，磁束急遽變動，同時勵磁安培匝也隨着它變動，後者是由正常的無負荷曲線找出來的。表六係在保持轉子電流不變條件下，週率變動時計算出來的 $\frac{I}{I_N}$ 值。

表 六

f	38	40	42	44	46	48	50
$\frac{I}{I_N}$	0.2	0.25	0.5	0.7	0.85	0.93	1.0

(5) 結 論 (註2)

1. 發電機可以在週率超過額定週率數的1.05倍的情況下運行。
2. 發電機可以在週率低於額定週率的情況下運行。但週率最多只能低至額定週率的0.82—0.85 (41—42週波)。可是在進行了發電機轉子溫昇試驗和試驗沒有局部發熱現象以後，發電機的出力可以較表中出力提高一些。

〔註1〕 發電機的損失可分兩部分，一部分與轉數的三次方成正比，約佔50%；其餘50%的損失如軸承、銅損、鐵損等當轉數增加時，並無顯著變化，可視為與轉數無關。下面公式： $\frac{\Delta t}{\Delta t_N} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + 1 \right) \frac{f_N}{f}$ ，並不是由計算引證得來的，而是由實際中推出的，因此它的數值不算太精確，