

饱和同步电抗的分析

叶 剑 秋

(电机系)

提 要

根据同步发电机额定负载时的电压变化求出的“饱和”同步电抗,未能正确反映电机内部的实际情况,本文指出它与额定负载时实际的饱和同步电抗是完全不同的两个概念,绝不能混淆。通过具体分析指出,将对应于空载时的饱和程度电抗作为负载的饱和程度的电抗是错误的,并澄清了有关文献中的错误和模糊概念。

关键词: 同步发电机, 同步电抗,

引 言

电抗数值取决于磁路的饱和程度,不同饱和程度时,电抗数值也不同。鉴于同步电机空载和负载两种情况下的饱和程度不同,使求解电压调整率时用的电抗压降所对应的同步电抗,与反映负载时电机内部实际饱和程度的饱和同步电抗,二者有很大的差别。

前者利用空载电势与额定电压的差值(同步电抗压降)求出。具体求解是利用空载特性与零功率因数特性曲线。由于空载时饱和程度相对较大,故其值较小。它仅用于求解电压调整率,而实际上不存在。

后者,由于同步发电机感性负载时电枢反应的去磁作用,使负载时电机内部的饱和程度远比空载时的要小,故其值较大。而且求解额定负载时的饱和同步电抗值必须以额定负载时的饱和程度为依据,找出对应的气隙内电势 E_δ ,作出线性化的空载特性曲线,然后,在其上找出对应于空载励磁磁势的计算空载电势 E'_0 ,最后求出饱和同步电抗 X_{s0} 。

由于隐极同步电机和凸极同步电机的磁路差别很大,故在分析同步电抗时,要分别研究。本文仅讨论隐极同步电机的电抗。在分析方法上,按磁路饱和与不饱和两种情况来分析,分别得到不饱和同步电抗 X_{su} 与饱和同步电抗 X_{s0} 。

一、电枢反应电抗 X_a 与同步电抗 X_s

当磁路不饱和时, $\mu_{Fe} = \text{const.}$ (常数)。可利用线性迭加原理,分别求出励磁之磁势(基波) \overline{F}_f 和电枢反应磁势(基波) \overline{F}_a 单独作用时,产生的磁通及对应的电势,然后迭加。

本文1985年9月6日收到

(一) 电磁关系

$$\left. \begin{array}{l} \overline{F}_f \rightarrow \dot{\phi}_o \rightarrow \dot{E}_o \\ \overline{F}_a \rightarrow \dot{\phi}_a \rightarrow \dot{E}_a \\ \quad \quad \rightarrow \dot{\phi}_\sigma \rightarrow \dot{E}_\sigma \end{array} \right\} = \dot{U} + \dot{I}r_a$$

由于 $E_a \propto \phi_a \propto I$, 故可用一比例常数 X_a ——电枢反应电抗把 E_a 和 I 联系起来, 即

$$X_a = \frac{E_a}{I} \quad (1)$$

或写成压降形式

$$E_a = IX_a \quad (2)$$

由于 E_a 落后于 $\dot{\phi}_a 90^\circ$ 电角, 又 $\dot{\phi}_a$ 与 \dot{I} 同相位, 故有

$$\dot{E}_a = -jIX_a \quad (3)$$

X_a ——电枢反应电抗。它表示单位电流所产生的电枢反应电势的大小。具体数值与电机的结构尺寸有关, 此处不多述。

同理有 $E_\sigma \propto \phi_\sigma \propto I$, 则比例常数为

$$X_\sigma = \frac{E_\sigma}{I} \quad (4)$$

$$\dot{E}_\sigma = -jIX_\sigma \quad (5)$$

X_σ ——电枢反应漏抗。它表示单位电流所产生的电枢反应漏电势的大小, 也与电机结构尺寸有关。

故可写出电势平衡方程式

$$\dot{E}_o + \dot{E}_a + \dot{E}_\sigma = \dot{U} + \dot{I}r_a \quad (6)$$

$$\text{或} \quad \dot{E}_o = \dot{U} + \dot{I}r_a + jIX_a + jIX_\sigma$$

$$= \dot{U} + \dot{I}r_a + jIX_s \quad (7)$$

其中

$$X_s = X_a + X_\sigma \quad (8)$$

称为同步电抗。当磁路不饱和时, 它也即是不饱和同步电抗 X_{su} 。

(二) 等值电路、矢量图:

根据电磁关系及电势平衡方程式, 可绘出不考虑饱和时隐极同步发电机的等值电路及矢量图, 如图 1 所示。

由等值电路可知, $Z_s = r_a + jX_s$ 为同步阻抗, 则同步发电机可看成一个具有内阻抗的电源。

在磁路不饱和时 $X_a = \text{Const}$

$$X_\sigma = \text{Const} \quad (\text{且很小})$$

故有

$$X_{su} = X_s \approx X_a = \text{Const}$$

上述等值电路形式简单、物理意义清楚, 在进行绝大多数运行问题的定性分析时, 被广泛采用。

应当指出, 由于未考虑饱和, 用这一等值电路进行定量分析会产生一定的误差 (如求电压

变化时), 这就需要采用饱和时的参数来求解。

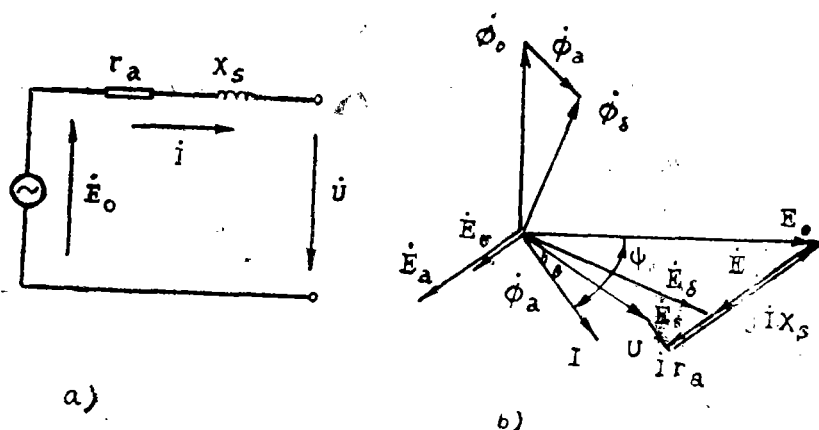


图1 a) 等值电路

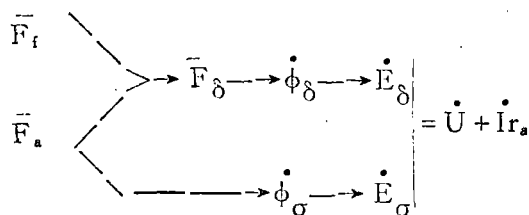
b) 矢量图

二、饱和同步电抗 X_{ss}

实际电机运行时, 一般处在饱和情况下。

考虑饱和时, $\mu_{Fe} \neq \text{Const}$, 不能再用线性迭加原理, 必须首先求出电机内的合成磁势 \bar{F}_δ , 然后通过磁化曲线找出对应的气隙磁通 $\dot{\phi}_\delta$ 和气隙电势 \dot{E}_δ 。

(一) 电磁关系:



电势平衡方程式

$$\dot{E}_\delta = \dot{E}_\sigma + \dot{U} + \dot{I}_a r_a \quad (9)$$

或

$$\dot{E}_\delta = \dot{U} + \dot{I}_a r_a + j \dot{I}_a X_\sigma \quad (10)$$

(二) 等值电路、矢量图:

由上述方程式绘出矢量图如图2所示

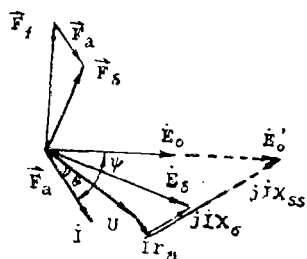


图2 考虑饱和时的隐极同步发电机的矢量图

由图可看出, 当考虑饱和时, 由于负载与空载时的饱和程度不一样 (一般感性负载时因电枢反应去磁作用而使饱和程度比空载时下降), 则此时

$$\dot{E}_0 \neq \dot{U} + \dot{I}_a r_a + j \dot{I}_a X_s$$

也不存在此种关系式。

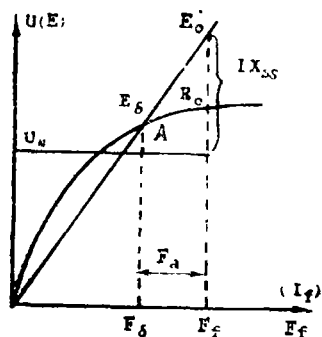
矢量图也不能闭合。与其对应的等值电路也不能成立。这均给分析和计算带来困难。此时需设法把磁化曲线 (或空载特性) 线性化, 求出和某一特

定负载的饱和情况相应的计算电势 E_o' ，再求出饱和同步电抗 X_{ss}

具体求法是：按负载情况算出气隙电势，如为额定负载时， $E_o = U_N + I_N X_o$ ，并决定运行点A，过原点O和运行点A作直线OA，把空载特性线性化，如图(3)所示。在该线性化的空载特性上由励磁磁势 F_f 求出该特定饱和程度下的计算电势 E_o' ，忽去电枢电阻 r_a ，

E_o' 与 U_N 之差即为饱和同步电抗压降。

$$\text{由于} \quad E_o' = U_N + I_N r_a + j I_N X_{ss} = \dot{U}_N + j I_N X_{ss}$$



$$\text{故饱和同步电抗} X_{ss} = \frac{E_o' - U_N}{I_N} \quad (11)$$

如此，在采用了计算空载电势 E_o' 及饱和同步电抗 X_{ss} 之后，即可绘出考虑饱和时隐极同步发电机的等值电路如图4及对应的矢量图如图2中虚线所示。

由图4与图1比较可知，它们具有相同的形式。

图3 隐极同步发电机饱和同步电抗的求解

三、计算同步电抗 X_{sc}

当保持发电机在额定负载($U = U_N$, $I = I_N$)下的励磁电流值不变并全部卸去负载时，发电机的端电压将升到空载电势 E_o ，则电压调整率为

$$\Delta U \% = \left(\frac{E_o - U_N}{U_N} \right) \times 100\% \quad (12)$$

在求额定电压调整率时，从空载特性及零功率因数特性曲线上 $U = U_N$ 处求得的同步电抗的“饱和值”(即利用空载电势 E_o 与额定电压 U_N 的差值求出的“饱和”同步电抗)见图5所示。

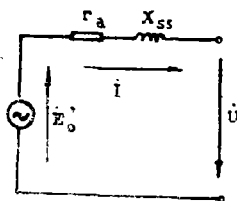


图4 等值电路

$$X_{sc} = \frac{E_o - U_N}{I_N} \quad (13)$$

它仅仅是一个计算用值，实际上是不存在的。故本文将其标记为 X_{sc} 并称其为计算同步电抗。如此则有。

$$I_N X_{sc} = E_o - U_N \quad (14)$$

或写为

$$E_o = U_N + I_N X_{sc} \quad (15)$$

当已知 X_{sc} 时，即可近似地(把额定负载当作零功率因数负载)求出电压变化和定额电压

调整率。

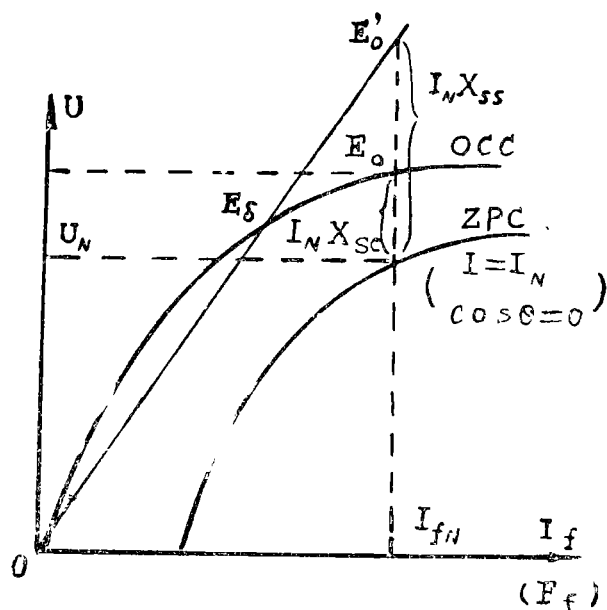


图5 利用空载特性及零功率因数特性曲线求解计算同步电抗 X_{sc} 及电压变化

四、饱和同步电抗 X_{ss} 与计算电抗 X_{sc} 的区别及应用

由公式(7)可知 $\dot{E}_0 \approx \dot{U} + j\dot{I}X_s$ 仅适用于不饱和时的情况, 式中的同步电抗为不饱和值 X_{s0} 。

当考虑饱和时, $\dot{E}_0 \neq \dot{U} + j\dot{I}X_{s0}$, 且矢量图不能闭合, 也不能再用矢量图来求解电压调整率, 但可以近似用计算电抗 X_{sc} 来求解, 见式(14)。

如果仍按公式 $\dot{E}_0 = \dot{U}_N + j\dot{I}_N X_s$, 把额定负载时的饱和同步电抗 X_{ss} 代入求解电压变化(近似零功率因数) $\Delta U = E_0 - U_N = I_N X_{ss}$, 则所求出的电压变化或电压调整率将远远大于实际值。

这是因为负载时的饱和程度远比空载时的小, 故同样励磁磁势下产生的定子电势, 负载时的数值 E'_0 要比空载时的数值 E_0 大得多。即 $E'_0 > E_0$ 。或者说实际负载时的饱和同步电抗 X_{ss} 要比计算同步电抗 X_{sc} 大得多。

总之, 计算同步电抗 X_{sc} 只能用于近似计算电压变化或额定电压调整率, 而它与负载时的饱和同步电抗是完全不同的。由实测数据可知, 一般二者的比值范围为 $1 : (1.5 \sim 3)$ 左右。

结 论

经过上述讨论,可以得出如下几点结论:

(1) 同步电抗是同步电机的重要参数,其数值的大小直接影响着电机的性能。 X_s 大,负载变化时,电压变化就大。

(2) 同步电抗值与饱和程度有关,当端电压变化,饱和程度改变时, X_s 也变化,饱和程度越高,其值越小。

(3) 不考虑饱和时,可用线性迭加原理,求出同步电抗的不饱和值 X_{su} 进而可绘出等值电路及矢量图来求解。常用来对运行问题作定性分析。

(4) 考虑饱和时,必须把空载特性线性化(针对某一特定负载的气隙电势 E_δ),求出与某一特定负载的饱和程度相对应的计算空载电势 E'_0 ,及采用饱和同步电抗 $X_{ss} = (E'_0 - U_N) / I_N$,仍可绘出等值电路及矢量图求解。

(5) 求解额定电压调整率时,可近似采用由空载特性及零功率因数负载曲线求出的计算同步电抗 X_{sc} ; $\Delta U = E_0 - U_N = I_N X_{sc}$ 。但绝不能把计算电抗 X_{sc} 当作负载时的饱和同步电抗 X_{ss} 。

(6) 在一般的感性负载时,由于去磁反应使负载时的饱和程度比空载时的要小,故负载时的饱和同步电抗 X_{ss} 比计算同步电抗 X_{sc} 要大。

参 考 文 献

- [1] 汤蕴璆 蒋忠珩《电机学》同步机部分 哈尔滨工业大学出版社 1962
- [2] 吴大榕 《电机学》 水电出版社1979,第二十五章
- [3] Van, E. Mablekos, ELECTRIC MACHINE THEORY FOR POWER ENGINEERS, HARPER & ROW PUBLISHERS, NEW YORK, P565—P575.
- [4] 电机工程手册(第四卷) 机械工业出版社 1982,第二章P(19—19)~P(19—20).

ANALYSIS OF THE SATURATED SYNCHRONOUS REACTANCE

Ye Jianqiu

(Electrical Engineering Department)

Abstract

This paper states the difference of the two kinds of synchronous reactance, which are the calculated synchronous reactance X_{sc} and the real saturated synchronous reactance X_s .

They are two different concepts. Don't get confused

The former is determined by the regulation of the full-load, which can be obtained from the open-circuit characteristic (i.e., the OCC curve) and the zero power-factor characteristic (i.e., the ZPFC curve).

The latter is obtained nearly from the linearised open-circuit characteristic (i.e., the LOCC curve) and the ZPFC curve.

Because these are the two conditions of saturation under no-load and full-load are very different, it is wrong to designate the former- X_{sc} as the saturated synchronous reactance.

Through the analysis, the paper points out and clears the mistaken concept in the relative article.

key words: synchronous generators, saturation synchronous reactance

(上接第85页)

$$\beta = \frac{\dot{V}_2'}{\beta \dot{I}_b} = \frac{\dot{V}_2'}{\beta \frac{\dot{V}_1'}{r_{be}}} = \frac{r_{be}}{\beta} K' \quad (\text{注: 此时由于 } \dot{I}_b \neq 0, \therefore \beta \dot{I}_b \neq 0, \text{即受控电流源的等效阻抗})$$

r_{β} 是客观存在的一个数值)。这正是一般文献中应用密勒定理时的解题思路。〔3〕

参 考 文 献

- 〔1〕邱关原主编, 电路(电工原理I), 人民教育出版社1978年
- 〔2〕康华光主编, 电子技术基础(上册)人民教育出版社1979年
- 〔3〕康华光等, 密勒定理及其在电子电路分析中的应用, 高等学校电工课程教学工作通讯第18期1982年
- 〔4〕曹慧君, 应用密勒定理值得注意的几个问题, 高等学校电工课程教学工作通讯第24期1983年

ALSO ON MILLER THEOREM AND ITS APPLICATION IN ELECTRONIC CIRCUIT ANALYSIS

Zhou Caiping

(Electrical Engineering Department)

Adstract

Miller Theorem, viewed from circuit theory, is in essence a diakoptic transformation. This paper has proved the Strictness of the theorem and Specified its applications with points for attention guarding against liable mistakes. Calculation examples are also provided.

key words: Miller Theorem