

# 六相同步发电机的稳态电磁参数

苟智德, 孙玉田, 张春莉, 魏玉国, 贲喜鹏

(哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘要:** 从 Park 方程的基本原理出发, 建立了六相同步发电机的基本方程, 得到了六相同步发电机的  $d$  轴等值电路和  $q$  轴等值电路。等值电路中的综合互感抗体现了六相同步发电机 2 个 Y 之间的磁耦合作用, 由电枢反应电抗和综合漏互感抗 2 部分组成。通过对六相同步发电机单 Y 运行 (另一 Y 开路) 和双 Y 运行的分析, 得出双 Y 运行同步电抗为 2 倍的单 Y 运行同步电抗与单 Y 自漏抗之差。以空载短路试验的实例, 测试了六相同步发电机特性曲线, 以及  $d$  轴同步电抗、自漏抗和短路比。从电磁理论分析和实际运行特性 2 方面, 验证了六相同步发电机的稳态电磁参数。

**关键词:** 六相同步发电机; 双 Y 移  $30^\circ$ ; 综合互感抗; 自漏抗; 磁耦合作用

**中图分类号:** TM 301.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1673-6540(2021)03-0062-06

**doi:** 10.12177/emca.2020.207

## Steady-State Electromagnetic Parameters of 6-Phase Synchronous Generator

GOU Zhide, SUN Yutian, ZHANG Chunli, WEI Yuguo, BEN Xipeng

(Harbin Electric Machinery Company Limited, Harbin 150040, China)

**Abstract:** Based on the basic principle of Park equation, the basic equation of the 6-phase synchronous generator is established, and  $d$ -axis and  $q$ -axis equivalent circuits of 6-phase synchronous generator are obtained. Comprehensive mutual reactance in equivalent circuits reflects the magnetic coupling function between double Y of the 6-phase synchronous generator. It consists of armature reaction reactance and comprehensive mutual leakage reactance. Through the analysis of single Y operation (the other Y no-load) and double Y operation of the 6-phase synchronous generator, it can be obtained that double Y synchronous reactance is equal to the difference of 2 times single Y synchronous reactance and self leakage reactance. Taking the example of no-load short-circuit test, the characteristic curve of 6-phase synchronous generator, the  $d$ -axis synchronous reactance, the self-leakage reactance, and the short-circuit ratio are measured. The steady-state electromagnetic parameters of the 6-phase synchronous generator are verified with the electromagnetic theory analysis and practical operation characteristics.

**Key words:** 6-phase synchronous generator; double Y with  $30^\circ$  phase-displacement; comprehensive mutual reactance; self leakage reactance; magnetic coupling function

## 0 引言

20 世纪 50 年代末, 研究人员提出用于大型汽轮发电机的六相双 Y 移  $30^\circ$  绕组整流装置<sup>[1]</sup>。20 世纪 70 年代末, 美国开始研究负载为惯性约束激光聚变装置的氙灯的六相脉冲同步发电机<sup>[2]</sup>。近年来, 六相同步发电机的研究和应用主

要在电磁炮动力、舰船电力推动、电动车辆驱动、核聚变电源装置<sup>[3-4]</sup>等方面。与传统三相同步发电机相比, 六相同步发电机改善了磁动势波形, 降低了线电压, 增加了整流逆变多相矢量的控制选择。六相同步发电机整流后, 还具有减少谐波含量、降低转矩脉动、减低振动和减小噪声、实现容错运行等优点<sup>[5-8]</sup>。

收稿日期: 2020-10-29; 收到修改稿日期: 2021-01-08

作者简介: 苟智德(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为大型发电机性能试验研究及故障分析。

六相同步发电机通常是指双 Y 移 30° 绕组的六相同步发电机,其定子上装设有 2 套 Y 接的三相绕组,每套 Y 接的三相绕组在空间上依次相差 120° 电角度,2 套 Y 接绕组的同相绕组在空间上错开 30° 电角度。六相同步发电机的转子与普通三相同步发电机一样,装设有励磁绕组和阻尼绕组<sup>[9-10]</sup>。因为六相同步发电机定子有 2 套绕组,而且 2 套绕组又有磁耦联系,所以其运行方式非常复杂<sup>[11-13]</sup>。

六相同步发电机的制造产品和技术资料相对较少,因此有必要对其电基本理论和实际运行特性进行深入的研究分析。本文以 1 台 300 MVA 六相同步发电机为实例,进行了稳态电磁参数的探讨。

## 1 六相同步发电机基本方程

六相同步发电机共有 9 个绕组,定子含 1Y 三相绕组、2Y 三相绕组,转子  $d$  轴上有一个励磁绕组  $f$  和一个等值阻尼绕组  $D$ ,  $q$  轴上有一个等值阻尼绕组  $Q$ 。六相同步发电机 9 个绕组示意图如图 1 所示。

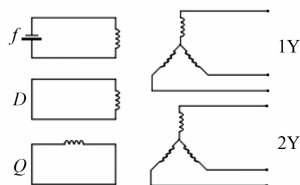


图 1 六相同步发电机 9 个绕组示意图

假设六相同步发电机为理想电机,应用双反应原理(Park 方程),在  $X_{ad}$  基准下可得其在  $dq$  坐标系统下的定子电压方程、转子电压方程、定子磁链方程、转子磁链方程。

定子电压方程为

$$\begin{cases} u_{d1} = p\psi_{d1} - \psi_{q1}p(\theta) - r_i i_{d1} \\ u_{q1} = p\psi_{q1} + \psi_{d1}p(\theta) - r_i i_{q1} \\ u_{d2} = p\psi_{d2} - \psi_{q2}p(\theta) - r_i i_{d2} \\ u_{q2} = p\psi_{q2} + \psi_{d2}p(\theta) - r_i i_{q2} \end{cases} \quad (1)$$

转子电压方程为

$$\begin{cases} u_f = p\psi_f + r_f i_f \\ 0 = p\psi_{zd} + r_{zd} i_{zd} \\ 0 = p\psi_{zq} + r_{zq} i_{zq} \end{cases} \quad (2)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{d1} = -x_d i_{d1} + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{zd} - x_{dM} i_{d2} \\ \psi_{d2} = -x_d i_{d2} + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{zd} - x_{dM} i_{d1} \\ \psi_{q1} = -x_q i_{q1} + x_{aq} i_{zq} - x_{qM} i_{q2} \\ \psi_{q2} = -x_q i_{q2} + x_{aq} i_{zq} - x_{qM} i_{q1} \end{cases} \quad (3)$$

转子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_f = x_{ff} i_f + x_{ad} i_{zd} - x_{ad} (i_{d1} + i_{d2}) \\ \psi_{zd} = x_{ad} i_f + x_{zd} i_{zd} - x_{ad} (i_{d1} + i_{d2}) \\ \psi_{zq} = x_{zq} i_{zq} - x_{ad} (i_{q1} + i_{q2}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $u_{d1}$ 、 $u_{q1}$  为 1Y 绕组  $d$ 、 $q$  轴电压;  $p$  为微分算子;  $\psi_{d1}$ 、 $\psi_{q1}$  为 1Y 绕组  $d$ 、 $q$  轴磁链;  $\theta$  为转子位置角;  $r_f$ 、 $r_{zd}$ 、 $r_{zq}$  为定转子绕组和阻尼绕组  $d$ 、 $q$  轴直流电阻;  $i_{d1}$ 、 $i_{q1}$  为 1Y 绕组  $d$ 、 $q$  轴电流;  $i_{d2}$ 、 $i_{q2}$  为 2Y 绕组  $d$ 、 $q$  轴电流;  $u_{d2}$ 、 $u_{q2}$  为 2Y 绕组  $d$ 、 $q$  轴电压;  $\psi_{d2}$ 、 $\psi_{q2}$  为 2Y 绕组  $d$ 、 $q$  轴磁链;  $u_f$ 、 $i_f$  为励磁电压、励磁电流;  $\psi_f$ 、 $\psi_{zd}$ 、 $\psi_{zq}$  为励磁绕组磁链, 阻尼绕组  $d$ 、 $q$  轴磁链;  $i_{zd}$ 、 $i_{zq}$  为阻尼绕组  $d$ 、 $q$  轴电流;  $x_d$ 、 $x_q$  为  $d$ 、 $q$  轴同步电抗;  $x_{ad}$ 、 $x_{aq}$  为  $d$ 、 $q$  轴电枢反应电抗;  $x_{dM}$ 、 $x_{qM}$  为  $d$ 、 $q$  轴综合互感抗;  $x_{ff}$ 、 $x_{zd}$ 、 $x_{zq}$  为励磁绕组自感抗和阻尼绕组  $d$ 、 $q$  轴自感抗。

## 2 六相同步发电机等值电路

### 2.1 等值电路

根据以上基本方程,六相同步发电机可以用一个具有 2 个外接支路的等值三相同步发电机来代替,2 个外接支路的阻抗为自漏抗。不计电阻的影响时,六相同步发电机的  $d$ 、 $q$  轴等值电路如图 2、图 3 所示。

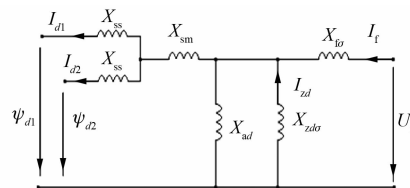


图 2  $d$  轴等值电路

### 2.2 综合互感抗

六相同步发电机的基本方程中,综合互感抗是一个重要的电磁参数,该参数反应了双 Y 之间的磁耦作用。综合互感抗由 2 部分组成:(1)通过气隙及转子的,即一个 Y 的电枢反应电抗;(2)不通过气隙的,即 2 个 Y 之间的综合漏互感抗。

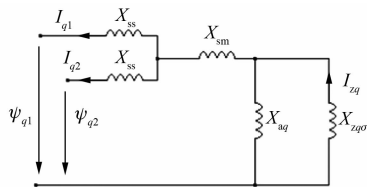


图3 q轴等值电路

$d$ 、 $q$ 轴综合互感抗可表示为

$$X_{dm} = X_{ad} + X_{sm} \quad (5)$$

$$X_{qm} = X_{aq} + X_{sm} \quad (6)$$

式中: $X_{sm}$ 为2个Y之间的综合漏互感抗。

从综合互感抗的构成说明,六相同步发电机双Y之间的磁耦作用有2个:(1)2个Y之间变压器原理的综合漏互感抗 $X_{sm}$ 的相互作用;(2)另一个Y的电枢反应电抗 $X_{ad}$ 的相互作用(对于 $q$ 轴是 $X_{aq}$ )。对于对称的理想电机,1Y对2Y的综合互感抗与2Y对1Y的综合互感抗之间的相互作用是相同的,数值也是相同的。

### 3 稳态运行的电磁参数

#### 3.1 单Y运行(另一Y开路)的电磁参数

六相同步发电机可以单Y运行(另一Y开路),单Y绕组有电压和电流,另一Y绕组只有开路电压。单Y运行(另一Y开路)的绕组,会受到另一Y绕组开路电压的影响。依据 $d$ 、 $q$ 轴等值电路,单Y同步电抗为单Y电枢反应电抗与单Y综合漏抗之和;单Y综合漏抗为2个Y之间的综合漏互感抗和单Y自漏抗之和。单Y同步电抗和单Y综合漏抗可表示为

$$X_{d(3)} = X_{ad} + X_{sm} + X_{ss} \quad (7)$$

$$X_{q(3)} = X_{aq} + X_{sm} + X_{ss} \quad (8)$$

$$X_{s(3)} = X_{sm} + X_{ss} \quad (9)$$

式中: $X_{d(3)}$ 、 $X_{q(3)}$ 为单Y $d$ 、 $q$ 轴同步电抗; $X_{s(3)}$ 为单Y综合漏抗; $X_{ss}$ 为单Y自漏抗。

六相同步发电机单Y运行(另一单Y开路)的同步电抗,与常规三相同步发电机的同步电抗相比,增加了2个Y之间的综合漏互感抗 $X_{sm}$ 。对于对称的理想六相同步发电机,1Y对2Y的综合漏互感抗与2Y对1Y的综合漏互感抗的数值是相同的。

#### 3.2 双Y运行的电磁参数

正常情况下,六相双Y移 $30^\circ$ 发电机是双Y

运行,双Y绕组同时输出电能,双Y绕组均有电压和电流。双Y同步电抗为单Y同步电抗与综合互感抗之和,双Y综合漏抗为2倍的综合漏互感抗与单Y自漏抗之和。双Y同步电抗和双Y综合漏抗可表示为

$$X_{d(6)} = X_{d(3)} + X_{dm} = 2X_{ad} + 2X_{sm} + X_{ss} \quad (10)$$

$$X_{q(6)} = X_{q(3)} + X_{qm} = 2X_{aq} + 2X_{sm} + X_{ss} \quad (11)$$

$$X_{s(6)} = 2X_{sm} + X_{ss} \quad (12)$$

式中: $X_{d(6)}$ 、 $X_{q(6)}$ 为双Y $d$ 、 $q$ 轴同步电抗; $X_{s(6)}$ 为双Y综合漏抗。

#### 3.3 双Y运行与单Y运行电磁参数的关系

对照单Y同步电抗和单Y综合漏抗的式(7)~式(9),以及双Y同步电抗和双Y综合漏抗的式(10)~式(12),可得双Y运行与单Y运行(另一Y开路)电磁参数的关系:

$$X_{d(6)} = 2X_{d(3)} - X_{ss} \quad (13)$$

$$X_{q(6)} = 2X_{q(3)} - X_{ss} \quad (14)$$

$$X_{s(6)} = 2X_{s(3)} - X_{ss} \quad (15)$$

从式(13)~式(15),可以看出双Y同步电抗为2倍的单Y同步电抗与单Y自漏抗之差;双Y综合漏抗为2倍的单Y综合漏抗与单Y自漏抗之差。六相同步发电机双Y运行时,由于2个Y之间的磁耦关系,双Y的电压电流相互影响、相互制约,不能单独运算。双Y运行的电磁参数,可以通过单Y运行(另一Y开路)确定的单Y电磁参数,然后利用二者的关系进行推算,单Y自漏抗是二者运行电磁参数之间的联系纽带。

### 4 六相同步发电机的空载和短路

#### 4.1 双Y空载

同步发电机空载特性是指在额定转速下,发电机定子电压和转子电流的变化曲线。常规三相同步发电机空载特性也是电机的磁化曲线,即磁场强度和磁感应强度的关系曲线。与常规三相电机不同,六相同步发电机的空载特性,不仅是磁化曲线,还有一部分是2个Y之间变压器原理的综合漏互感抗 $X_{sm}$ 的感应电压。

#### 4.2 双Y短路

短路特性指在额定的转速下,发电机电枢绕组三相稳态短路时,电枢电流与励磁电流之间的关系曲线,实际上是电枢反应的体现。六相同步发电机的双Y绕组同时发生电枢反应,需要励磁

电流与双 Y 2 组绕组电流同时相对应。

### 4.3 单 Y 空载, 另一单 Y 短路

六相同步发电机可以单 Y 空载、另一单 Y 短路, 这是该类型电机的一大特点。利用单 Y 空载和另一单 Y 短路, 可以确定单 Y 自漏抗。对于短路的单 Y, 在不计定子电阻时, 气隙磁场感应的电动势与单 Y 自漏抗由短路电流引起的电压降相平衡, 即:

$$E_1 = I_D \cdot X_{s(3)} = I_D \cdot (X_{sm} + X_{ss}) \quad (16)$$

式中:  $E_1$  为气隙磁场感应的电动势;  $I_D$  为短路电流。

对于开路的单 Y, 除了气隙磁场感应的电动势外, 还有短路单 Y 电流产生的综合漏互感磁通感应的电动势。在不计定子电阻时, 这 2 个电动势的方向恰好相反。因此, 开路单 Y 的相电压  $U_K$  为

$$U_K = E_1 - I_D \cdot X_{sm} = I_D \cdot X_{ss} \quad (17)$$

$$X_{ss} = U_K / I_D \quad (18)$$

式中:  $U_K$  为开路单 Y 的相电压。

在式(18)中  $U_K$  为相电压, 采用线电压计算时, 单 Y 自漏抗为单 Y 空载、另一单 Y 短路时, 同一励磁电流下的单 Y 空载线电压与另一单 Y 的  $\sqrt{3}$  倍的短路电流之比为

$$X_{ss} = U_L / \sqrt{3} I_D \quad (19)$$

式中:  $U_L$  为开路 Y 的线电压。

单 Y 空载、另一单 Y 短路有 2 种形式: (1) 1Y 空载、2Y 短路; (2) 1Y 短路、2Y 空载。对于对称的理想六相同步发电机, 2 种形式分别确定的单 Y 自漏抗应是相同的。

## 5 空载短路试验实例

### 5.1 试验电机的设计值

试验电机为 1 台立式六相同步发电机, 额定容量为 300 MVA、额定定子电压为 3 000 V、额定定子电流为 28 868 A, 基值阻抗为单 Y 额定定子电压与单 Y 的  $\sqrt{3}$  倍额定定子电流之比, 为  $0.06 \Omega$ 。

### 5.2 空载短路特性曲线

#### 5.2.1 双 Y 空载特性曲线

根据双 Y 空载测试数据, 以励磁电流为横坐标, 以空载电压/额定电压 (标幺值) 为纵坐标, 绘制双 Y 空载特性曲线, 如图 4 所示。以低电压下 4 个测点的励磁电流为横坐标, 空载电压/额定电

压为纵坐标绘制曲线, 该曲线向上线性延长, 为空载曲线气隙线。

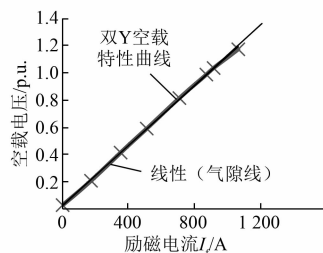


图4 双 Y 空载特性曲线(1Y)

双 Y 空载特性曲线有 2 条, 分别为 1Y 空载特性曲线和 2Y 空载特性曲线, 本文只绘制了 1Y 空载特性曲线 (双 Y 空载)。由图 4 双 Y 空载特性曲线 (1Y) 上对应定子额定空载电压 (3 000 V) 的励磁电流值, 为 875 A; 双 Y 空载气隙线上对应定子额定空载电压 (3 000 V) 的励磁电流值, 为 870 A。

#### 5.2.2 双 Y 短路特性曲线

根据双 Y 短路测试数据, 以励磁电流为横坐标, 定子短路电流/定子额定电流 (标幺值) 为纵坐标, 绘制双 Y 短路特性曲线, 如图 5 所示。

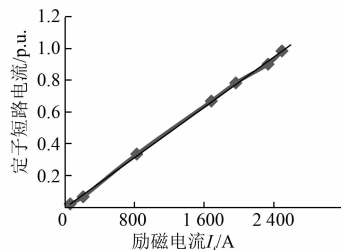


图5 双 Y 短路特性曲线(1Y)

双 Y 短路特性曲线有 2 条, 分别为 1Y 短路特性曲线和 2Y 短路特性曲线, 本文只绘制了 1Y 短路特性曲线 (双 Y 短路)。由图 5 双 Y 短路特性曲线 (1Y), 对应定子额定短路电流 (28 868 A) 的励磁电流值, 为 2 510 A。

#### 5.2.3 单 Y 空载和另一单 Y 短路特性曲线

根据单 Y 空载和另一单 Y 短路试验数据, 以励磁电流为横坐标, 分别以空载电压/额定电压 (标幺值) 和定子短路电流/定子额定电流 (标幺值) 为纵坐标, 绘制单 Y 空载、单 Y 短路特性曲线, 如图 6 所示。

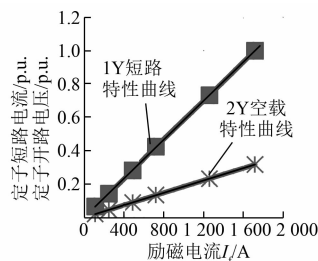


图6 单Y空载、另一单Y短路特性曲线  
(1Y短路、2Y空载)

单Y空载和另一单Y短路特性曲线有2组,每组2条。第一组特性曲线为1Y空载特性曲线、2Y短路特性曲线。第二组特性曲线为1Y短路特性曲线、2Y空载特性曲线,图6只绘制了第二组。由图6单Y空载、单Y短路特性曲线,对应定子额定短路电流(28 868 A)的励磁电流值,为1 700 A。

## 6 d轴同步电抗和短路比的确定

### 6.1 单Y d轴同步电抗的确定

单Y d轴同步电抗(标么值),是取单Y短路特性上(另1Y开路)对应于额定电流时的励磁电流值与双Y空载特性曲线气隙线上对应的额定空载电压的励磁电流值之比。双Y空载气隙线上对应定子额定空载电压(3 000 V)的励磁电流值,为870 A;单Y空载、另一单Y短路特性曲线,对应定子额定短路电流(28 868 A)的励磁电流值,为1 700 A。则单Y d轴同步电抗  $X_{d(3)} = 1\,700/870 = 1.954$ (标么值)。

### 6.2 自漏抗的确定

单Y自漏抗为单Y空载、另一单Y短路时,同一励磁电流下的单Y空载线电压与另一单Y的 $\sqrt{3}$ 倍短路电流之比。在励磁电流1 715.3 A,单Y空载线电压951.7 V,另一单短路电流28 854 A。则自漏抗  $X_{ss} = (951.7/28\,854)/1.732\,\Omega = 0.019\,\Omega$ ,换算到标么值可得自漏抗  $X_{ss} = 0.019/0.06 = 0.317$ (标么值)。

### 6.3 双Y d轴同步电抗的确定

双Y d轴同步电抗为2倍的单Y d轴同步电抗与单Y自漏抗之差。则双Y d轴同步电抗  $X_{d(6)} = 2 \times 1.954 - 0.317 = 3.591$ (标么值)。

### 6.4 单Y短路比的确定

双Y空载饱和特性曲线上对应于额定电压

时的励磁电流值与单Y空载、另一单Y短路时的短路特性曲线上对应于额定电流时的励磁电流值之比。则单Y短路比  $K_{c(3)} = 875/1\,700 = 0.515$ 。

### 6.5 双Y短路比的确定

双Y空载饱和特性曲线上对应于额定电压时的励磁电流值与双Y短路特性曲线上对应于额定电流时的励磁电流值之比。则双Y短路比  $K_{c(6)} = 875/2\,510 = 0.349$ 。

### 6.6 测试结果分析

d轴同步电抗和短路比是稳态六相同步发电机运行特性中非常重要的2个参数。通过上述的电磁参数理论分析和实际测试可知,单Y d轴同步电抗与双Y d轴同步电抗,单Y短路比与双Y短路比,均不是整数2倍的关系。这是由于自漏抗的作用,使双Y d轴同步电抗低于2倍的单Y d轴同步电抗、双Y短路比高于1/2倍的单Y短路比。

单Y空载、另一单Y短路,是六相同步发电机特殊的运行工况,通过该试验可以确定自漏抗  $X_{ss}$ 。在该试验中,对于空载的单Y绕组,由于另一单Y短路绕组中没有电压,没有了综合漏互感抗  $X_{sm}$  感应的电压,因此同一励磁电流下,单Y空载电压低于双Y空载电压。对于短路的另一单Y绕组,因为单Y空载中没有绕组电流,所以该单Y绕组没有电枢反应,则同一励磁电流下,另一单Y的短路电流,要高于双Y同时短路的短路电流。

按照空载短路试验确定的电磁参数与实际的电磁参数存在一定偏差,原因是:(1)忽略了高次谐波、磁路饱和,使基本方程和电磁参数理想化;(2)在公式推导中不计定子直流电阻和双Y之间的互感抗当作相同数值对待,简约了电磁参数的确定。虽然存在一定的误差,但是测试的稳态电磁参数足以在实际工程中得以应用。

## 7 结 语

本文应用双反应原理,得到dq坐标系下六相同步发电机的基本方程,并获得六相同步发电机的d、q轴等值电路,进而得到六相同步发电机的电磁参数关系。

六相同步发电机的综合互感抗体现了定子2个Y之间的磁耦关系。通过单Y运行(另一Y开路)和双Y运行电磁参数相互关系的对比分析可

知,双Y同步电抗为2倍的单Y同步电抗与单Y自漏抗之差,双Y综合漏抗为2倍的单Y综合漏抗与单Y自漏抗之差。单Y自漏抗是单Y运行(另一Y开路)和双Y运行电磁参数之间的联系纽带。利用单Y空载和另一单Y短路,可以确定单Y自漏抗。单Y自漏抗为单Y空载、单Y短路时,同一励磁电流下的单Y空载线电压与另单Y的 $\sqrt{3}$ 倍短路电流之比。

通过1台300 MVA六相同步发电机的空载短路试验,确定了该电机的单Y d轴同步电抗、自漏抗、双Y d轴同步电抗、单Y短路比、双Y短路比,验证了六相同步发电机的电磁参数和运行特性。

### 【参考文献】

- [1] 李浩. 六相永磁同步电机电磁设计及其电感参数的研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [2] 华中工学院电机教研组六相电机科研组. 六相30°相带绕组的同步发电机[J]. 华中工学院学报, 1974(3): 19.
- [3] PRATAP S B, DRIGA M D. Compensation in pulsed alternators[J]. IEEE Transactions on Magetics, 1999, 35(1): 372.
- [4] PENG J, XUAN W, WANG H, et al. Study on matching a 300 MVA motor generator with an ohmic heating power supply in HL-2M [J]. Plasma Science and

Technology, 2013, 15(3): 120.

- [5] 温增银, 胡会骏. 六相双Y 30°相带绕组同步发电机短路的暂态过程[J]. 华中工学院学报, 1974(4): 34.
- [6] 刘剑, 谭芳堃, 赵博, 等. 基于基波电流调控法的六相永磁同步电动机转矩波动抑制方法研究[J]. 微电机, 2020, 53(7): 49.
- [7] 马秀娟, 郑安琪, 张华强, 等. 双Y移30°六相PMSM的滑模变结构控制技术[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10): 20.
- [8] 刘胜, 郭晓杰, 张兰勇. 六相永磁同步电机鲁棒自适应反步滑模容错控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(5): 68.
- [9] 王玲文, 赵荣国, 艾永乐. 六相感应电机定子绕组设计与计算[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 98.
- [10] 李朗如, 许实章, 代晓宁. 六相双Y移30°绕组同步发电机突然短路电流和电磁转矩的试验研究[J]. 华中工学院学报, 1979(增刊2): 29.
- [11] 严晶晶, 霍现旭, 王海巍, 等. 双d, q坐标系下六相同步风力发电机控制策略[J]. 电力电子技术, 2017, 51(11): 34.
- [12] 白敬彩, 王国柱, 范峥, 等. 六相感应电机驱动系统的简易制动方案设计[J]. 电气传动, 2020, 50(8): 3.
- [13] 黄堃, 张楠, 黄麟. 双Y移30°永磁同步电机逆变器开路故障诊断方法[J]. 微电机, 2020, 53(1): 84.

(上接第61页)

- [4] 孟大伟, 姜明丽. 高效高压中型异步电机绝缘结构设计分析[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 13.
- [5] 孟庆超. 大电机主绝缘端部电场分析与数值仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2013.
- [6] ZHANG J, WANG S, QIU J, et al. Finite element analysis and evaluation of stator insulation in high voltage synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Magetics, 2012, 48(2): 955.
- [7] 汤蕴璆. 电机内的电磁场[M]. 2版. 北京:科学出版社, 1998.
- [8] 祁世发, 闫伟嘉, 刘洋, 等. H级高压电机绝缘结构

研究[J]. 防爆电机, 2019, 54(2): 21.

- [9] 中国机械工业联合会. JB/T 5811—2007: 交流低压电机成型绕组匝间绝缘试验方法及限值[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [10] 中国电器工业协会. GB/T 755—2019: 旋转电机定额和性能[S]. 北京:中国标准出版社, 2019.
- [11] 全国绝缘材料标准化技术委员会. JB/T 4061. 1—1995: 柔软复合材料聚酯薄膜聚芳酰胺纤维纸柔软复合材料[S]. 北京:中国标准出版社, 1995.
- [12] 曹洪志. 冲裁参数对无取向硅钢冲片冲裁质量的影响研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.