# 用于船舶综合电力推进的同步发电机电磁设计

张洋 吴旖

(中国船舶重工集团公司第704研究所 上海 200031)

**摘要** 建立了同步发电机直接带整流负载的数学模型,通过对其运行状态的分析,推导了以 换相重叠角为自变量的同步发电机—整流系统电流、电压谐波畸变计算公式。根据换相重叠角与 发电机电磁参数的关联,确立了系统谐波特性与发电机电磁参数间的函数关系。分析了变压器对 同步发电机—整流系统谐波特性的影响,利用仿真验证了发电机电磁参数、推进变压器对系统谐 波畸变的影响规律,最后利用搭建的同步发电机-整流系统试验平台对部分仿真结果进行了验证。 确定了适用于船舶综合电力推进系统的同步发电机的电磁参数设计方法。

关键词: 电磁参数 谐波 同步发电机 整流器 中图分类号: U665.12

# Design of Synchronous Generator for Integrated Power Propulsion System in Marine

Zhang Yang Wu Yi

(No. 704 Research Institute CSIC Shanghai 200031 China)

**Abstract** A mathematics model for synchronous generator with rectifier was built up. By analyzing the operation of the system, the formulas of the harmonic distortion for synchronous generator-rectifier system current and voltage were supplied with the overlap angle as variable. Based on the connection between overlap angle and electromagnetism parameters, the function between the harmonic characteristics of the system and the electromagnetism parameters of the generator were brought forward. The influence of transformer on synchronous generator-rectifier system had got. The simulation validated the rule that influence of electromagnetism parameters and propulsion transformer on the harmonic distortion. Finally, some of the simulation result had got proved through a generator-rectifier system experimental platform. Make up a rule for three phase generator design for electromagnetism parameter used in integrated power system.

Keywords: Electromagnetic parameter, harmonic, synchronous generator, rectifier

# 1 引言

船舶综合电力推进技术的应用日益广泛,但所 带非线性负载——推进变流器,在运行时其整流元 件的导通和关断会对电网侧引入大量谐波。谐波使 电网的电能品质下降,增加了供电系统的电磁干扰, 使发电机产生附加谐波损耗,造成严重危害,因此 需要采取特定措施抑制谐波畸变[1]。 谐波抑制有多种措施,如增加滤波器、采用多 脉动移相整流等。这些方法都会造成供电系统成本 增高、占用舱室变大等问题。而从电机电磁设计角 度降低系统谐波畸变也是一种有效和经济的措施。

就电磁关系而言,同步发电机具有更普遍的意 义;变流器的整流部分对电网侧的谐波畸变起决定 作用。因此,国内外对发电机带变流器负载时的谐 波研究主要以同步发电机带整流器负载的形式为主。

国内外开展有关同步发电机带整流器负载的研 究已有较长的历史,研究的领域涉及同步发电机 -整流系统的运行特性、交直流变换关系、系统的数

收稿日期 2011-06-12 改稿日期 2012-12-10

学模型、系统的运行稳定性、系统的数学仿真和短路电流计算等方面<sup>[2-6]</sup>。这些文献分析中,一般将同步发电机-整流系统等效成理想电压源-电抗-整流器的形式。在进行发电机端谐波分析时,忽略了电机电磁参数对电源和谐波畸变的影响;或是仅仅求出换相重叠角与谐波畸变间的函数关系,未在理论上建立谐波畸变与电机电磁参数间的直接联系;或是仅通过试验与仿真对谐波变化趋势进行归纳,未对其规律进行解析。

文献[7]推导了三相同步发电机直接带变流器负 载或经变压器带变流器负载时换相重叠角与交流侧 电压波形畸变的关系,并分析了变压器漏抗对电压 波形畸变的影响。在此基础上,本文得到了同步发 电机-整流系统换相重叠角与交流侧电流波形畸变的 关系,建立了换相重叠角与电磁参数的近似函数, 更进一步推导了同步发电机-整流系统的谐波畸变计 算公式,建立了谐波畸变与电磁参数的直接联系, 找出了减小综合电力推进系统谐波畸变的同步发电 机电磁参数设计方法。

# 2 原理

在同步发电机-整流系统中,发电机输出三相交 流电,经三绕组变压器移相,构成 12 脉波整流电 路。而在发电机与整流桥之间接入变压器相当于在 线路中串入阻抗,可以将变压器折算后等效至发电 机侧,因此发电机不经变压器直接三相整流的结论 可以推广应用于接有变压器的状况。下面将分别对 发电机直接整流、发电机经变压器整流情况下的系 统谐波特性进行分析与计算。

## 2.1 发电机直接带整流负载

如图 1 所示,为了简化分析,引入如下假设<sup>[8]</sup>:



图 1 同步发电机直接带整流负载示意图

(1)发电机的空载电动势为正弦波。

(2) 电流换相过程可看成超瞬变过程,且发电

机的超瞬变电抗  $x''_{d} \approx x''_{q}$ 。分析整流过程时,同步发电机可用正弦波电动势  $E_1$ 和换相电抗  $x_1$ 来等效。

(3) 二极管作为理想开关元件处理。

这些假设不影响分析的正确性,所得出的结论 在可以考虑到上述因素后依然可以成立。

此时,发电机等效正弦波电动势为

$$\begin{cases} e_{a} = -\sqrt{2}E_{1}\sin\left(\theta - \delta\right) \\ e_{b} = -\sqrt{2}E_{1}\sin\left(\theta - \delta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_{c} = -\sqrt{2}E_{1}\sin\left(\theta - \delta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$
(1)

同样假定在同步发电机转子 q 轴方向布置一个 短路绕组 fq。该绕组在暂态过程中的特性与 d 轴的 励磁绕组 fd 对应,只是短路且无电源激励。在公共 磁链假定下, d 轴上各个绕组的自感抗可分为两部 分,一部分与公共磁链相对应,其标幺电抗值均为 x<sub>ad</sub>,剩余部分与该绕组的漏磁链对应,其标幺值分 别为各绕组的漏抗部分<sup>[9,10]</sup>,即

$$\begin{cases} x_{d} = x_{1} + x_{ad} \\ x_{ffd} = x_{fdl} + x_{ad} \\ x_{11d} = x_{1dl} + x_{ad} \\ x'_{d} = x_{1} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fdl}}\right)} \\ x''_{d} = x_{1} + \frac{1}{\left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{fdl}} + \frac{1}{x_{1dl}}\right)} \end{cases}$$
(2)

式中 x<sub>d</sub>——直轴同步电抗; x<sub>ffd</sub>——励磁绕组电抗;

x11d——直轴阻尼绕组电抗;

x'd--直轴瞬变电抗;

x<sup>"</sup>\_\_\_\_直轴超瞬变电抗,同理可以得到交轴

电抗。

下面对发电机直接带整流负载进行分析,可以 得到发电机三相电压的数学表达式<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} u_{a} = -\sqrt{2}E_{1}\sin\left(\theta - \delta\right) - x_{t}\frac{di_{a}}{dt} - ri_{a} \\ u_{b} = -\sqrt{2}E_{1}\sin\left(\theta - \delta - \frac{2\pi}{3}\right) - x_{t}\frac{di_{b}}{dt} - ri_{b} \quad (3) \\ u_{c} = -\sqrt{2}E_{1}\sin\left(\theta - \delta + \frac{2\pi}{3}\right) - x_{t}\frac{di_{c}}{dt} - ri_{c} \end{cases}$$

式中  $x_t$ ——换相电抗,  $x_t = (x''_d + x''_q)/2;$ 

;

$$E_1$$
——电动势幅值,且 $E_1 =$   
 $\sqrt{\frac{[E'_q - (x'_d - x''_d)i_d]^2 + [E'_d + (x'_q - x''_q)i_q]^2}{2}};$   
 $\theta$ ——转子 d 轴领先 a 相轴线的电角度,  
 $\theta = \omega t;$   
 $r$ ——电枢电阻;  
 $\delta$ ——电机功率角,且 $\delta = \arccos \frac{E'_d + (x'_q - x''_q)i_q}{E'_q - (x'_d - x''_d)i_d}$   
 $E'_q, E'_d$ ——瞬态电动势;且 $E'_q = \frac{x_{ad} \psi_{fd}}{x_{ad} + x_{fdl}},$   
 $E'_d =$ 

实际计算时,可近似取 
$$i_d \approx E'_q - E''_q / (x'_d - x''_d)$$
和  
 $i_q \approx E'_d - E''_d / (x'_q - x''_q)$ (此两式在阻尼绕组电流  
 $i_{1d}=0$ 

和 *i*1g=0 时严格成立)。

对 E1 进一步化简,可以得到

 $x_{aq} + x_{fql}$ 

$$E_1 \approx \sqrt{\frac{(E_q'')^2 + (E_d'')^2}{2}}$$
 (4)

$$\begin{split} E_{q}'' &\longrightarrow q 轴超瞬变电动势, \quad E_{q}'' = \\ & \frac{x_{ad}}{x_{ffd}x_{11d} - x_{ad}^{2}} \big[ (x_{11d} - x_{ad}) \psi_{fd} + (x_{ffd} - x_{ad}) \psi_{1d} \big]; \end{split}$$

 $E''_{d}$ ——d 轴超瞬变电动势,  $E''_{d}$  =

$$\frac{-x_{\rm aq}}{x_{\rm ffq}x_{\rm 11q}-x_{\rm aq}^2} \Big[ (x_{\rm 11q}-x_{\rm aq})\psi_{\rm fq} + (x_{\rm ffq}-x_{\rm aq})\psi_{\rm 1q} \Big] \, \cdot$$

由此可见,发电机的空载电动势幅值是一个超 瞬态参量。当同步发电机带整流负载时,由于整流 元件的单向导通性和开关过程使得发电机负载三相 不对称、电流波形发生畸变。而整流桥换相重叠过 程的存在使得发电机输出电压波形发生畸变。发电 机带整流负载时的状态相当于发电机实际上处于不 断地在导通和换相之间切换的过程,这一过程可近 似为不断变化的两相突然短路。这样也就意味着超 瞬变参数对发电机电压的波形有很大影响。

#### 2.2 运行分析及谐波计算

在实际运行中整流桥存在换相重叠过程,有换相重叠角 $\gamma \in (0, \pi/3)$ ,对一个周期  $2\pi$ 内 $i_a$ 的变化情况进行分析,如式(5)所示<sup>[11,12]</sup>

$$i_{a} = \begin{cases} \frac{\sqrt{6}E_{1}}{2x_{t}} \left[ 1 - \cos\left(\theta - \delta + \frac{5\pi}{6}\right) \right] & -\frac{5\pi}{6} \leqslant \theta - \delta \leqslant -\frac{5\pi}{6} + \gamma \\ \frac{\sqrt{6}E_{1}}{2x_{t}} \left( 1 - \cos\gamma \right) & -\frac{5\pi}{6} + \gamma \leqslant \theta - \delta \leqslant -\frac{\pi}{6} \\ \frac{\sqrt{6}E_{1}}{2x_{t}} \left[ \cos\left(\theta - \delta + \frac{\pi}{6}\right) - \cos\gamma \right] & -\frac{\pi}{6} \leqslant \theta - \delta \leqslant -\frac{\pi}{6} + \gamma \\ 0 & -\frac{\pi}{6} + \gamma \leqslant \theta - \delta \leqslant \frac{\pi}{6} \\ \frac{\sqrt{6}E_{1}}{2x_{t}} \left[ -1 - \cos\left(\theta - \delta + \frac{5\pi}{6}\right) \right] & \frac{\pi}{6} \leqslant \theta - \delta \leqslant \frac{\pi}{6} + \gamma \\ -\frac{\sqrt{6}E_{1}}{2x_{t}} \left( 1 - \cos\gamma \right) & \frac{\pi}{6} + \gamma \leqslant \theta - \delta \leqslant \frac{5\pi}{6} \\ \frac{\sqrt{6}E_{1}}{2x_{t}} \left[ \cos\left(\theta - \delta + \frac{\pi}{6}\right) + \cos\gamma \right] & \frac{5\pi}{6} \leqslant \theta - \delta \leqslant \frac{5\pi}{6} + \gamma \\ 0 & \frac{5\pi}{6} + \gamma \leqslant \theta - \delta \leqslant \frac{7\pi}{6} \end{cases}$$

$$(5)$$

根据式(5)可以求出换相重叠角γ为

$$\gamma = \arccos\left(1 - 2x_t \frac{I_d}{\sqrt{6E_1}}\right) \tag{6}$$

式中 Id--整流桥直流侧电流;

*E*<sub>1</sub>——相电压有效值。

在计及换相过程但忽略直流侧电流脉动的情况 下,考虑到交流侧电抗不为零,根据推导出的交流 侧电流的表达式(5),对相电流 *i*a进行傅里叶分 解,可以求出电流总的谐波畸变 见式(7)。

根据式(7)可以做出电流总的谐波畸变 *I*<sub>THD</sub> 随换相重叠角 γ 变化的曲线。从图 2 中可以看出,





$$I_{\text{THD}} = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{3} \left[ \left( 4\gamma - \frac{8\pi}{3} \right) \cos \gamma + \frac{2\pi}{3} \cos 2\gamma + 2\left(\pi + \gamma\right) - 4\sin \gamma - \sin 2\gamma \right] - \left( \sin^2 \gamma - \gamma \sin 2\gamma + \gamma^2 \right)}{\sqrt{\sin^2 \gamma - \gamma \sin 2\gamma + \gamma^2}}$$
(7)

在换相重叠角小于 60°(π/3)范围内, *I*<sub>THD</sub>随着换 相重叠角γ的增大而减小,并近似成线性递减的关 系。

同时可以得到 *u*<sub>ab</sub>在一个周期π时间内的数学表 达式如下:

$$u_{ab} = \begin{cases} -\frac{3\sqrt{2}E_1}{2}\sin\left(\theta - \delta + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{5\pi}{6} \le \theta - \delta \le -\frac{5\pi}{6} + \gamma \\ -\sqrt{6}E_1\sin\left(\theta - \delta + \frac{\pi}{6}\right) & -\frac{5\pi}{6} + \gamma \le \theta - \delta \le -\frac{\pi}{2} \\ -\frac{3\sqrt{2}E_1}{2}\sin\left(\theta - \delta\right) & -\frac{\pi}{2} \le \theta - \delta \le -\frac{\pi}{2} + \gamma \\ -\sqrt{6}E_1\sin\left(\theta - \delta + \frac{\pi}{6}\right) & -\frac{\pi}{2} + \gamma \le \theta - \delta \le -\frac{\pi}{6} \\ 0 & -\frac{\pi}{6} \le \theta - \delta \le -\frac{\pi}{6} + \gamma \\ -\sqrt{6}E_1\sin\left(\theta - \delta + \frac{\pi}{6}\right) & -\frac{\pi}{6} + \gamma \le \theta - \delta \le \frac{\pi}{6} \end{cases}$$

$$(8)$$

对线电压 *u*<sub>ab</sub> 进行傅里叶分解,可以求出电压总的谐波畸变为

$$V_{\rm THD} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi} \left(\gamma - \frac{1}{2}\sin\gamma\right) - \left(\frac{3}{2\pi}\right)^2 \left(\sin^2\gamma - \gamma\sin 2\gamma + \gamma^2\right)}}{\sqrt{\left[1 - \frac{3}{2\pi} \left(\gamma - \frac{1}{2}\sin\gamma\right)\right]^2 + \left(\frac{3}{2\pi}\sin^2\gamma\right)^2}}$$
(9)

根据式(9)可以做电压总的谐波畸变  $V_{\text{THD}}$  随 换相重叠角  $\gamma$  变化的曲线,如图 3 所示。



图 3 V<sub>THD</sub> 随换相重叠角变化曲线

Fig.3 Variation curve of  $V_{\text{THD}}$  with overlap angle

从图 3 可以看出,在换相重叠角小于 60°范围

从图 2 和图 3 中可以看出,发电机带整流负载 时,总谐波畸变 *I*<sub>THD</sub> 和 *V*<sub>THD</sub> 与换相重叠角 γ 有密 切关系。

#### 2.3 换相重叠角与电磁参数

忽略直流侧脉动时,  $I_d$ 、 $E_1$ 为恒量, 根据式 (6) 有

$$\gamma \approx \arccos\left(1 - \frac{x_{\rm t}}{Z_{\rm b} + x_{\rm t}}\right) \tag{10}$$

#### 式中 Z<sub>b</sub>——发电机阻抗基值。

根据式(2)分析,有 $x_t \in (0, Z_b)$ 。此时可推出 以为 $x_t$ 自变量的减函数 $[1-x_t/(Z_b+x_t)] \in (1/2, 1)$ ,可 得

$$\gamma(x_t) \propto x_t$$
 (11)

函数 $\gamma(x_t)$ 的变化曲线如图 4 所示,为递减函数, 有 $\gamma$ ∈(0,  $\pi$ /3)。



## 图 4 函数γ(xt)的变化曲线

Fig.4 Variation curve of function  $\gamma(x_t)$ 

结合图 2、图 3 和式(11)可以得出:随着换 相电抗 x<sub>t</sub>的增大,换相重叠角 γ逐渐增大;电压总 谐波畸变 V<sub>THD</sub>增大,电流总谐波畸变 I<sub>THD</sub>却是减 小的。

对于换相电抗 *x*<sub>t</sub>, 有 *x*<sub>t</sub>=(*x*<sup>*r*</sup><sub>d</sub> + *x*<sup>*r*</sup><sub>q</sub>)/2≈ *x*<sup>*r*</sup><sub>d</sub> ≈ *x*<sup>*r*</sup><sub>q</sub>。 结合式(2)可分析得出:随着发电机定子绕组漏抗、 励磁绕组漏抗和阻尼绕组漏抗的增大,超瞬变电抗 逐渐增大,使得换相电抗增大。

综上所述,发电机直接带整流负载时的谐波畸 变与电磁参数有密切关系。随着发电机超瞬变电抗 的增大,电压 V<sub>THD</sub> 增大,电流 I<sub>THD</sub> 却是减小的。因此,在发电机电磁设计时,可通过减小超瞬态电抗值以降低发电机端电压总谐波畸变 V<sub>THD</sub>。

#### 2.4 发电机经变压器带整流负载

两绕组变压器的简化等效电路如图 5 所示,三 绕组变压器的简化等效电路如图 6 所示。这对变压 器的运行计算不会带来明显的误差<sup>[13]</sup>。

在图 5 的简化等效电路中,两绕组变压器的等 效阻抗表现为一串联阻抗 *z*<sub>δ</sub>,称为等效漏阻抗,如 式(12)所示。



图 5 两绕组变压器的简化等效电路

Fig.5 Predigesting Circuit of two windings transformer

$$\begin{cases} z_{\delta} = z_{1\delta} + z'_{2\delta} = r + jx_{\delta} \\ x_{\delta} = x_{1\delta} + x'_{2\delta} \\ r = r_{1} + r'_{2} \end{cases}$$
(12)

式中  $r_1, x_{1\delta}$ ——变压器初级一次阻抗;



图 6 三绕组变压器的简化等效电路

Fig.6 Predigesting Circuit of three windings transformer

同理,可以根据图 6 得出三绕组变压器折合至 一次侧的等效漏阻抗。

接入变压器相当于在线路中增加漏阻抗,因此 分析同步发电机直接带整流负载所得出的结论同样 适用于有变压器的情况。

2.4.1 变压器为两绕组变压器

考虑到如图 1 所示系统中接入两绕组变压器时, 有<sup>[14]</sup>

$$V_{\rm THD} = \frac{k_{\rm x}\sqrt{\frac{3}{2\pi}\left(\gamma - \frac{1}{2}\sin\gamma\right) - \left(\frac{3}{2\pi}\right)^2 \left(\sin^2\gamma - \gamma\sin 2\gamma + \gamma^2\right)}}{\sqrt{\left[1 - \frac{3}{2\pi}k_{\rm x}\left(\gamma - \frac{1}{2}\sin\gamma\right)\right]^2 + \left(\frac{3}{2\pi}k_{\rm x}\sin^2\gamma\right)^2}}$$
(13)

式中  $k_x$ —一分压系数,  $k_x = x_t/(x_t + x_\delta) = x_t/x'_t$ ;

 $x_{\delta}$ ——折算到一次侧的变压器漏抗。 根据式(10)可推出换相重叠角

$$\gamma = \arccos\left(1 - \frac{x_t'}{Z_b + x_t'}\right) \tag{14}$$

结合式(13)、式(14)做出  $V_{\text{THD}}$ 随  $x_{\text{t}}$ 和  $x_{\delta}$ 变化的曲线,如图 7 所示。可判断出:发电机经 两绕组变压器带整流负载时,随着发电机超瞬变电 抗的增大,换相重叠角  $\gamma$ 增大,电压  $V_{\text{THD}}$ 逐渐增大。





Fig.7 Variation curve of  $V_{\text{THD}}$  with  $x_t$  and  $x_\delta$ 

电流 *I*<sub>THD</sub> 的数学表达式同式(7)一致,因此可推断出:随着发电机超瞬变电抗的增大,换相重叠角γ增大,电流 *V*<sub>THD</sub> 却是逐渐减小的。

2.4.2 变压器为三绕组变压器

通常在同步发电机-整流系统中,发电机输出三 相交流电,经三绕组变压器移相,使 2个6脉波整 流电路直接并联构成 12脉波整流电路。对于三绕 组变压器,其 V<sub>THD</sub>的计算公式为

$$V_{\text{THD}} = \frac{k_{x}\sqrt{\frac{3}{\pi}\left(\gamma - \frac{1}{2}\sin\gamma\right) - \left(\frac{3}{\pi}\right)^{2}\left(\sin^{2}\gamma - \gamma\sin2\gamma + \gamma^{2}\right)}}{\sqrt{\left[1 - \frac{3}{\pi}k_{x}\left(\gamma - \frac{1}{2}\sin\gamma\right)\right]^{2} + \left(\frac{3}{\pi}k_{x}\sin^{2}\gamma\right)^{2}}}$$
(15)

式中 
$$k_x = x_t / [x_t + x_{1\delta} + (x'_{2\delta} + x'_{3\delta})/2] = x_t / x''_t$$
;

x18——一次绕组漏抗;

x<sub>2δ</sub>, x<sub>3δ</sub>——二次绕组折算到一次侧的漏抗。

根据式(14)可推出换相重叠角为

$$\gamma \approx \arccos\left[1 - \frac{x_t''}{Z_b + x_t''}\right] \tag{16}$$

因此可判断出,由前文经两绕组变压器整流电 路时所得出的谐波变化规律同样适用于经三绕组变 压器整流电路。

换相电抗 x<sub>1</sub>"的接入对发电机端电压谐波含量有

两种相反的作用:一方面, x<sub>1</sub>" 增大使换相重叠角

γ增大;另一方面,由于变压器漏抗对谐波电压的 分压作用又能使 V<sub>THD</sub>减小。但从总的效果来说,发 电机端 V<sub>THD</sub> 会减小。

#### 2.5 发电机电磁设计

发电机的谐波畸变与电机的电磁参数息息相关, 根据 2.3 节所得出的结论,可通过减小超瞬态电抗 值以降低发电机端电压总谐波畸变 V<sub>THD</sub>。

在发电机电磁设计中,  $x_{1dl}$ 一般均小于  $x_{ad}$ 和  $x_{fdl}$ 。由式(2)可以得出,  $x_1$ 和  $x_{1dl}$ 对  $x''_d$ 起着决定 性的影响。因此,可以通过设计较小的  $x_1$ 和  $x_{1dl}$ 以 减小  $x''_d$ ,降低发电机电压谐波畸变,提高供电品质。

定子漏抗 x<sub>1</sub>主要由定子的铁心长度、槽数、每 相串联导体数和绕组分布等多个因素确定,计算较 为复杂;同时 x<sub>1</sub>的改变会引起电机多个参数变化, 此时需对变化参数进行重新校核。综上所述,通过 减小 x<sub>1</sub>以降低 x'<sub>d</sub>的方法所需过程较为繁琐。

对阻尼绕组漏抗 x<sub>1dl</sub>进行调节时,其结果仅对 超瞬变参数有影响,无需对稳态和瞬态参数进行校 核,易于实现。因此,减小 x<sub>1dl</sub>是降低 x<sup>''</sup><sub>d</sub>值的有效 措施。

漏抗的计算问题可以归结为相应的比漏磁导的 计算<sup>[15]</sup>,阻尼绕组漏磁导为

$$\lambda = 0.62 + \frac{h_0}{b_0} + 0.06 \frac{\tau}{l} n_c \tag{17}$$

由式(17)可见,阻尼绕组漏磁导与阻尼条根数 n<sub>c</sub>、阻尼绕组槽高 h<sub>0</sub>、阻尼槽口宽 b<sub>0</sub> 有关。因此,合理设计阻尼槽型参数,能起到控制阻尼绕组漏抗值的作用,可进一步减小超瞬变电抗值,降低发电机电压谐波畸变。

## 3 仿真分析

为了验证发电机超瞬态参数对系统谐波畸变的 影响,本文建立如图 8 所示的同步发电机-整流系 统仿真模型<sup>[16]</sup>。



图 8 同步发电机 - 整流系统仿真模型示意图 Fig. 8 Sketch of simulation model for synchronous

## generator-propulsion converter system

推进变流器经由三绕组推进变压器,采用 2个6脉波整流器并联输出的形式,此时推进负载 占总功率的70%。整流器直流输出侧计入平波电抗 和滤波电容环节,此时可以忽略直流侧电流、电压 脉动。两绕组日用变压器接线性负载。下面分两种 情况对系统谐波畸变进行仿真。

#### 3.1 参数变化 1

以设计值为基准,超瞬态电抗 x<sub>d</sub> 、 x<sub>q</sub> 同时从

计值的 0.7~1.5 倍范围内进行变化。此时,发电机 的其余电磁参数根据式(2)进行计算,具体变化 方式如下所示:

(1) 只有超瞬态电抗改变。

(2) 超瞬态、瞬态电抗改变,稳态电抗不变。

(3) 超瞬态、瞬态和稳态电抗都发生改变。

运行仿真可以得到 3 种变化方式各 9 组电流、 电压 THD 随超瞬态电抗变化值,如图 9 中所示。 图中以 d 轴分量代表全部 d 和 q 轴分量。



图 9 电流、电压 THD 随超瞬变电抗变化规律

Fig.9 Variation rule of THD for current and voltage with subtransient reactance

从图 9 中可以看出, 3 种方式下的超瞬态电抗 的变化趋势完全一致, 所得 3 条曲线完全重合。

#### 3.2 参数变化 2

以设计值为基准,超瞬态电抗,瞬态电抗,稳 态电抗分别从设计值的 0.7~1.5 倍范围内进行变化。 此时,发电机的其余电磁参数根据式(2)进行计 算,具体变化方式如下所示:

(1) 只有超瞬态电抗改变,其他参数不变;

(2) 只有瞬态电抗改变,其他参数不变;

(3) 只有稳态电抗改变,其他参数不变。

运行仿真可以得到 3 种变化方式各 9 组电流、 电压 THD 随超瞬态电抗变化值,如图 10 中所示。 图中以 d 轴分量代表全部 d 和 q 轴分量。

从图 10 可以看出, 3 种方式下的超瞬态电抗的 变化趋势完全一致, 所得 3 条曲线中只有方式

(1)中的电流、电压 THD 发生变化;方式(2)、(3)所得 THD 不变。

综上所述,根据图 9 和图 10 的仿真结果可以 推出:同步发电机 -整流系统中的谐波畸变与发电机 的超瞬态电抗有密切关系。随着发电机超瞬变电抗 的增大,电压 *V*<sub>THD</sub> 增大,电流 *I*<sub>THD</sub> 却是减小的。





#### 3.3 变压器漏抗对谐波畸变的影响

取发电机功率为额定功率,推进变压器原、副 边绕组漏抗值为原始值的 10 倍,即  $x'_{\delta}=10x_{\delta}$ 。增大

变压器漏抗前后的谐波畸变见下表。

表 变压器漏抗对 THD 的影响

Tab	Influence of transformer leak reactance on THD	

变压器漏抗	<i>I</i> <sub>THD</sub> (%)	$V_{\rm THD}$ (%)
$x_{\delta}$	4.49	7
$x'_{\delta} = 10x_{\delta}$	4.37	6.81

仿真结果表明:在一定范围内增大变压器漏抗,可以起到降低发电机侧电流谐波畸变 *I*<sub>THD</sub>和电压谐 波畸变 *V*<sub>THD</sub>的作用。其原因在于接入变压器后,仅 相当于在发电机整流电路的交流侧每相串联一个变 压器漏抗 *x*<sub>δ</sub>和漏电阻 *r*,相应增大了系统中每相的 换相电抗和电阻。忽略电阻增加的影响,当换相电 抗增大时,换相重叠角 γ 也增大,这导致 *I*<sub>THD</sub>减小; 同时又由于变压器漏抗对谐波电压的分压作用又导 致发电机端 *V*<sub>THD</sub> 减小,如上表中仿真结果所示,同 时也与 2.4 节中的分析结果一致。

## 4 试验验证

建立如图 8 所示的同步发电机一整流系统试验 平台,系统各组成部分参数及运行条件与仿真状态 一致。

记录系统运行时发电机侧电流和电压的单次谐 波畸变率,并将试验结果与仿真结果进行对比,如 图 11 和图 12 所示。

从仿真和试验的对比结果可见:电流和电压的 特征谐波皆为 12k±1次;电流各次谐波含量仿真值 与试验值一致;电压各次谐波含量的仿真值比试验 值偏大,但变化趋势一致。因此,可判断用本文所 建立的仿真模型验证发电机电磁参数对系统谐波特 性影响的分析结果是可信的。



图 11 电流各次谐波试验与仿真结果对比

Fig.11 Comparisons of per current harmonic between test and simulation



图 12 电压各次谐波试验与仿真结果对比 Fig.12 Comparisons of per voltage harmonic between test and simulation

## 5 结论

(1)在船舶综合电力推进系统中,同步发电机的电流和电压谐波畸变与推进变流器整流环节换相时的换相重叠角有密切关系,系统中影响换相重叠角γ的参数或变量,都将影响发电机侧的电流和电压谐波畸变。随着换相重叠角的增大,电压谐波畸变逐渐增大,电流谐波畸变逐渐减小。

(2)在同步发电机一整流系统中,同步发电机电磁参数是影响换相重叠角的直接因素。仿真研究表明,超瞬变电抗是影响换相重叠角的唯一参数。减小超瞬变电抗可以减小换相重叠角,从而降低发电机的电压谐波畸变,但电流谐波畸变却是增大的。

(3)在一定范围内通过减小发电机的超瞬态参数值可以降低系统的电压谐波畸变。

(4)通过设计较小的定子漏抗和阻尼绕组漏抗 以减小超瞬变电抗,可降低发电机电压谐波畸变, 提高供电品质。而对阻尼绕组漏抗进行调节是有效 的措施。

## 参考文献

 [1] 冯英华, 吴旖, 杨平西. 综合全电力系统主发电机谐 波损耗分析与算法 [J]. 船舶工程, 2008, 30(5): 12-15.

Feng Yinghua, Wu Yi, Yang Pingxi. Analysis and algorithm of harmonic loss of main generator in the integrated whole electric system[J]. Ship Engineering, 2008, 30(5): 34-37.

- Bowick W J, Jones W H. Performance of a synchronous generator with a bridge rectifier[J]. Proc. IEE, 1972, 119(9): 1338-1342.
- [3] 张晓锋,张盖凡,郑逢时.带整流负载的同步发电 机电路模型[J].清华大学学报,1997,37(4):97-100.
  Zhang Xiaofeng, Zhang Gaifan, Zheng Fengshi.
  Circuit model of rectified synchronous generators[J].
  Journal of Tsinghua University, 1997, 37(4): 97-100.
- [4] Bowick W J. Voltage waveform distribution in synchronous generator with bridge rectifier loading[J].
   Proc. IEE, 1980, 127(1): 13-19.
- [5] Paul W Franklin. A theoretical study of the three phase salient pole type generator with simultaneous AC and bridge rectified DC out part I and part II[J]. IEEE Trans. on PAS, 1973, 92(2): 543-557.
- [6] 马伟明,胡安.袁立军.十二相同步发电机整流系统 直流侧突然短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 31-36.
  Ma Weiming, Hu An, Yuan Lijun. Sudden DC-side short circuit of a 12-phase synchronous generatorrectifier system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 31-36.
- [7] 马伟明,张盖凡.三相同步发电机供交直流 混合负载时交流电压波形的畸变 [J].电工技术学报,1996,11(4):36-42.
   Ma Weiming, Zhang Gaifan. AC voltage harmonic

distortion of three-phase synchronous generator with AC and rectified DC load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(4): 36-42.

- [8] 马伟明. 十二相同步发电机及其整流系统的研究[D]. 北京:清华大学, 1995.
- [9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论与 分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [10] 孙俊忠, 姜海龙. 3/12 相双绕组交直流发电机的电

路模型[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(2): 12-16. Sun Junzhong, Jiang Hailong. Circuit model of 3/12phase double-winding AC-DC generators[J]. Electric Machines & Control Application, 2006, 33(2): 12-16.

- [11] 林桦,乔明忠.同步发电机整流电路电压电流的谐 波计算[J].船电技术,1998,6(1):1-7.
- [12] Masaaki Sakui, Hiroshi Fujita. An analytical method for calculating harmonic currents of a three-phase diode-bridge rectifier with DC filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(6): 631-637.
- [13] 汤蕴璆, 史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [14] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版 社.
- [15] 张洋,杨平西,刘林生,等.船舶电力推进同步发电机-推进变流器系统谐波特性仿真 [J]. 船舶工程, 2009, 31(2): 39-42.

Zhang Yang, Yang Pingxi, Liu Linsheng, et al. Harmonic characteristic simulation of the synchronous generator propulsion converter system in electric propulsion[J]. Ship Engineering, 2009, 31(2): 39-42.

[16] Chang G W, Chin Y C, Lee S H. Analyzing input harmonic currents of a six-pulse AC/DC converter by an efficient time-domain approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 6(14): 324-331.

作者简介:张 洋 男, 1983 生, 硕士, 工程师, 研究方向为电机 设计。吴 旖 女, 1985 生, 硕士, 工程师, 研究方向为船舶电站。