

# 励磁电流脉动对电枢绕组空载电压波形的影响

夏永洪, 黄劭刚

(南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:**为了不影响齿谐波励磁的混合励磁永磁同步发电机的运行性能,需要正确处理好齿谐波磁场的利用与电枢绕组电压波形畸变两者之间的关系,此为利用齿谐波实现混合励磁的关键问题。应用电机理论定性分析了齿谐波励磁系统输出的励磁电流产生脉动的原因,以及该脉动电流产生的附加磁场在电枢绕组中感应谐波电动势的特点。采用在齿谐波励磁系统直流侧并联电容的方法,可以减小励磁电流的脉动,从而削弱其在电枢绕组中引起的谐波电动势。对一台齿谐波励磁的混合励磁永磁同步发电机进行了计算和实验,计算结果和实验结果比较验证了理论分析的正确性。

**关键词:**混合励磁; 永磁电机; 同步发电机; 齿谐波励磁; 脉动电流

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1007-449X(2012)09-0021-05

## Influence of field current pulsation on no-load voltage waveform of armature windings

XIA Yong-hong, HUANG Shao-gang

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** It needs to correctly handle the relationship between utilization of tooth harmonic magnetic field and armature winding voltage waveform distortion for not affecting the operation performance of the hybrid excitation permanent magnet synchronous generator utilizing tooth harmonic for excitation, which is key problem utilizing tooth harmonic to achieve hybrid excitation. The reason of the field current pulsation provided by the tooth harmonic excitation system and the characteristics of the harmonic electromotive force (EMF) in the armature winding induced by the additional magnetic field were analyzed qualitatively based on the electric machine theory. Employing the method of shunting capacitance in the tooth harmonic excitation system can reduce the pulsation of the field current and weaken the harmonic EMF in the armature winding. Calculation and test are performed for one hybrid excitation permanent magnet synchronous generator utilizing tooth harmonic for excitation, and the comparison of calculated and experimental results verifies the correctness of the theoretical analysis.

**Key words:** hybrid excitation; permanent magnet machines; synchronous generators; tooth harmonic excitation; pulsating current

收稿日期: 2012-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(50777030)

作者简介: 夏永洪(1978—),男,博士,讲师,研究方向为电机及其控制;

黄劭刚(1948—),男,硕士,教授,硕士生导师,研究方向为电机电子系统仿真、电机电磁场分析、电机励磁和电机控制。

通讯作者: 夏永洪

## 0 引言

永磁电机具有结构简单、效率高以及功率密度高等优点,因此,永磁电机的应用非常广泛<sup>[1-4]</sup>,但缺点在于永磁电机气隙磁场调节困难。在保持永磁电机优点同时,为了克服其缺点,巧妙地利用电机中固有的齿谐波磁场形成了一种新型无刷无励磁机的齿谐波励磁的混合励磁永磁同步发电机<sup>[5-6]</sup>。该电机转子上有两套绕组:齿谐波绕组和励磁绕组,两套绕组通过二极管整流桥相连。其中齿谐波绕组的作用是获取气隙中的齿谐波磁场能量,整流后提供给发电机的励磁绕组,励磁绕组产生的磁场用于调节电机的气隙磁场。

齿谐波励磁的混合励磁永磁同步电机定、转子表面均开有槽,使得气隙磁场中既有定子开槽产生的齿谐波磁场,又有转子开槽产生的齿谐波磁场。同时,当齿谐波励磁系统接通时,齿谐波绕组电流以及励磁电流的交流分量也会在气隙中产生附加磁场,这些附加磁场和齿谐波磁场都会在定子电枢绕组中感应谐波电动势,从而导致定子电枢绕组电动势波形畸变。因此,处理好齿谐波磁场的利用和电枢绕组电压波形畸变两者之间的关系是利用齿谐波实现混合励磁的关键。

针对定、转子开槽产生的齿谐波磁场在定子电枢绕组中感应的齿谐波电动势的削弱方法,文献[7]进行了详细的分析和讨论。本文主要分析齿谐波励磁系统输出的励磁电流产生脉动的原因,以及该脉动电流引起的附加磁场在定子电枢绕组中感应的谐波电动势的特点,并提出削弱该谐波电动势的方法,最后用理论计算和实验加以验证。

## 1 励磁电流脉动的产生机理

当转子 $\nu$ 次谐波励磁磁动势作用在定子 $\nu_s$ 阶齿谐波磁导上时,气隙中的齿谐波磁场可以表示为

$$b_1(\theta, t) = \frac{\lambda_{s\nu_s} F_{m\nu}}{2} \left\{ \cos \left[ \left( \nu_s \frac{Z_1}{p} + \nu \right) \theta + \nu_s \frac{Z_1}{p} \omega t \right] + \cos \left[ \left( \nu_s \frac{Z_1}{p} - \nu \right) \theta + \nu_s \frac{Z_1}{p} \omega t \right] \right\}, \quad (1)$$

其中: $\theta$ 为转子坐标系的电角度; $F_{m\nu}$ 为 $\nu$ 次谐波励磁磁动势幅值; $t$ 为时间; $\omega$ 为电机旋转的电角速度; $Z_1$ 为电机定子槽数; $p$ 为电机的基波极对数; $\lambda_{s\nu_s}$ 为定子各阶齿谐波磁导幅值;文中的磁导均指单位面积的磁导。

由式(1)可知,气隙磁场中含有 $\frac{\nu_s Z_1}{p} + \nu$ 次和

$\frac{\nu_s Z_1}{p} - \nu$ 次齿谐波磁场,相对转子转速分别为

$$\frac{\nu_s Z_1}{p} + \nu \omega \text{ 和 } \frac{\nu_s Z_1}{p} - \nu \omega, \text{ 在转子齿谐波绕组中感应}$$

应 $\frac{\nu_s Z_1}{p}$ 次齿谐波电动势。

齿谐波绕组的齿谐波电动势经过二极管整流后得到的励磁电压为一脉动的直流电压,其脉动的频率为 $\frac{2\nu_s Z_1 f_1}{p}$ ,相应地,励磁电流也是一个脉动的直流电流,该电流可以表示为

$$i_{fd} = I_{fd0} + \sum_{\nu_s=1,2,3,\dots}^{\infty} I_{fdm\nu_s} \cos \left( 2\nu_s \frac{Z_1}{p} \omega t \right), \quad (2)$$

其中: $I_{fd0}$ 为励磁电流的恒定直流分量; $I_{fdm\nu_s}$ 为励磁电流 $\nu_s$ 阶交流分量幅值。

## 2 励磁绕组脉动电流产生的附加磁场及削弱

脉动电流产生的磁动势可以表示为

$$f_{fd} = \sum_{\nu_s=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{\nu_{fd}=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{fdm\nu_s\nu_{fd}} \cos \left( 2\nu_s \frac{Z_1}{p} \omega t \right) \cos \nu_{fd} (\alpha - \omega t - \gamma_{fd}) = \sum_{\nu_s=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{\nu_{fd}=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{F_{fdm\nu_s\nu_{fd}}}{2} \left\{ \cos \left[ \left( 2\nu_s \frac{Z_1}{p} - \nu_{fd} \right) \omega t + \nu_{fd} \alpha - \nu_{fd} \gamma_{fd} \right] + \left[ \left( 2\nu_s \frac{Z_1}{p} + \nu_{fd} \right) \omega t - \nu_{fd} \theta + \nu_{fd} \gamma_{fd} \right] \right\}, \quad (3)$$

其中: $\alpha$ 为定子坐标系的电角度; $F_{fdm\nu_s\nu_{fd}}$ 为 $\nu_s$ 阶谐波电流产生的 $\nu_{fd}$ 次谐波磁动势幅值; $\gamma_{fd}$ 为脉动电流产生的 $\nu_{fd}$ 次谐波磁动势在 $t=0$ 时领先定子坐标原点的电角度。

脉动电流产生的磁动势作用在平均气隙磁导 $\lambda_0$ 上产生的附加磁场为

$$b_{fd,\lambda_0}(\alpha, t) = f_{fd}(\alpha, t) \lambda_0 = \lambda_0 \sum_{\nu_s=1,2,3,\dots}^{\infty} \sum_{\nu_{fd}=1,3,5,\dots}^{\infty} \times \frac{F_{fdm\nu_s\nu_{fd}}}{2} \left\{ \cos \left[ \left( 2\nu_s \frac{Z_1}{p} - \nu_{fd} \right) \omega t + \nu_{fd} \alpha - \nu_{fd} \gamma_{fd} \right] + \left[ \left( 2\nu_s \frac{Z_1}{p} + \nu_{fd} \right) \omega t - \nu_{fd} \alpha + \nu_{fd} \gamma_{fd} \right] \right\}. \quad (4)$$

由式(4)可知,附加磁场相对定子的转速为

$$\frac{2}{\nu_{fd}} \frac{\nu_s Z_1}{p} - \nu_{fd} \omega \text{ 和 } \frac{2}{\nu_{fd}} \frac{\nu_s Z_1}{p} + \nu_{fd} \omega, \text{ 在定子电枢绕组中}$$

感应  $2 \frac{\nu_s Z_1}{p} - \nu_{fd}$  次和  $2 \frac{\nu_s Z_1}{p} + \nu_{fd}$  次谐波电动势,其中次数为  $2 \frac{Z_1}{p} - 1$  次和  $2 \frac{Z_1}{p} + 1$  次的谐波电动势最

强,与励磁磁动势作用在定子齿谐波磁导上产生的齿谐波磁场在电枢绕组中感应的二阶齿谐波电动势形式相同,但两者产生的根源和途径均不同,前者产生的根源是励磁绕组中的脉动电流,途径是平均气隙磁导,后者产生的根源是励磁磁动势(或者励磁绕组中的恒定直流电流),途径是定子齿谐波磁导。

因此,减小励磁电压和励磁电流的脉动是削弱附加磁场在电枢绕组中产生的  $2 \frac{\nu_s Z_1}{p} - \nu_{fd}$  次和  $2 \frac{\nu_s Z_1}{p} + \nu_{fd}$  次谐波电动势的根本措施,即可以采用在齿谐波励磁系统的直流侧并联电容的方法加以实现。

### 3 仿真计算与实验验证

为了验证理论分析的正确性,对一台齿谐波励磁的混合励磁永磁同步发电机进行了计算和实验,图1是电机的截面图和原理图。

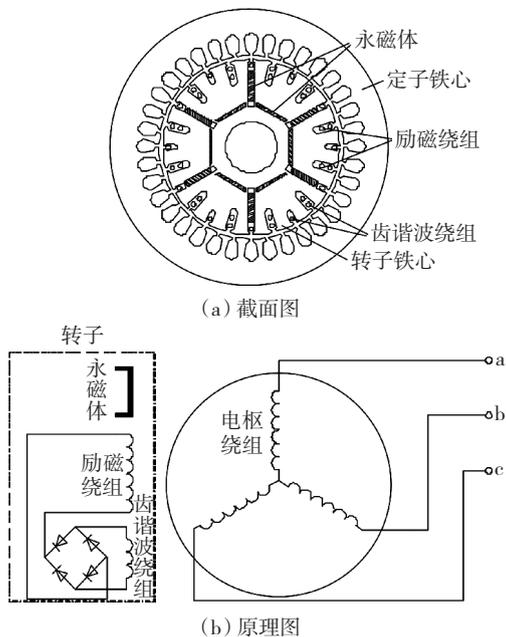


图1 齿谐波励磁的混合励磁永磁同步发电机

Fig. 1 The hybrid excitation permanent magnet synchronous generator utilizing tooth harmonic for excitation

电机参数:额定功率为3.0 kW,额定电压为220 V,额定电流为8.75 A,额定频率为50 Hz,极对数为3,相数为3,定子槽数为45,转子槽数为60,定子电枢绕组为Y接,并联支路数为1,每相串联匝数为120

匝,转子齿谐波绕组串联匝数为186匝,励磁绕组串联匝数为330匝,定子直槽,定子外直径为260 mm,转子外直径为178.2 mm,气隙长度为0.9 mm,铁心长度为100 mm,定子槽口宽为5.2 mm,转子槽口宽为3.6 mm。为了方便实验时能够直接测量到转子励磁绕组和齿谐波绕组的电压和电流,在样机的轴端安装了电刷和滑环。

采用有限元法对该电机进行了仿真计算<sup>[6,8-9]</sup>,其中绕组端部漏抗采用传统电机设计的方法获得<sup>[10]</sup>。仿真参数:电枢绕组相电阻为0.52 Ω,电枢绕组端部漏感为146.40 μH;励磁绕组电阻为3.26 Ω;励磁绕组端部漏感为496.85 μH;齿谐波绕组电阻为2.36 Ω;齿谐波绕组端部漏感为11.16 μH;二极管道通时的压降为0.7 V。

图2是齿谐波励磁系统接通前电枢绕组空载线电压计算波形和实验波形。图3~图5分别是齿谐波励磁系统接通后励磁电压、励磁电流以及电枢绕组空载线电压的计算波形和实验波形。表1是齿谐波励磁系统接通前后电枢绕组空载线电压波形中主要的谐波分量对基波的百分比值。

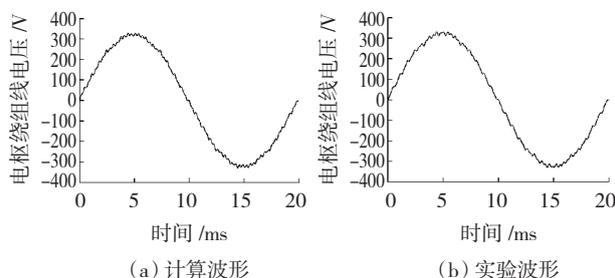


图2 齿谐波励磁系统接通前电枢绕组空载线电压波形  
Fig. 2 No-load line voltage waveform of the armature windings when tooth harmonic excitation system is open

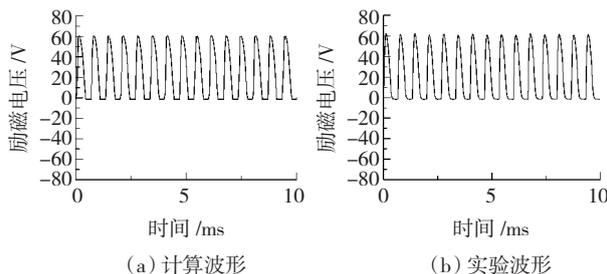


图3 齿谐波励磁系统接通后励磁电压波形

Fig. 3 Field voltage waveform when tooth harmonic excitation system is closed

由图2和图5的对比可知,当齿谐波励磁系统接通后,电枢绕组波形畸变更严重,其波形畸变率的计算值由2.8%增加到4.4%,波形畸变的主要原因是29次和31次谐波含量增加,如表1所示。

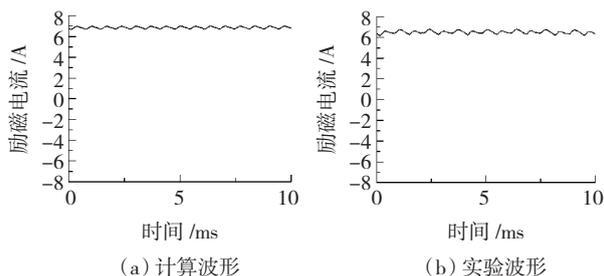


图4 齿谐波励磁系统接通后励磁电流波形

Fig. 4 Field current waveform when tooth harmonic excitation system is closed

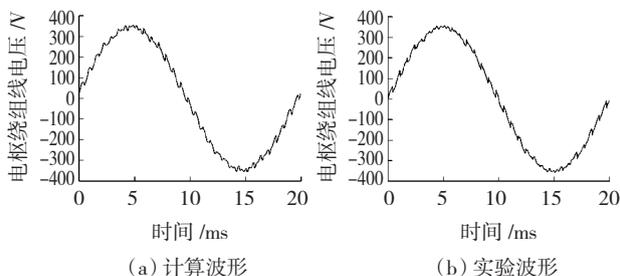


图5 齿谐波励磁系统接通后电枢绕组空载线电压波形

Fig. 5 No-load line voltage waveform of the armature windings when tooth harmonic excitation system is closed

表1 齿谐波励磁系统接通前后电枢绕组空载线电压波形中主要的谐波分量对基波的百分比值

Table 1 The percentage of the main harmonic to the fundamental of the no-load line voltage waveform of the armature winding when tooth harmonic excitation system is from open to closed

谐波次数	齿谐波励磁系统接通前		齿谐波励磁系统接通后	
	谐波对基波的百分比计算值/%	谐波对基波的百分比实验值/%	谐波对基波的百分比计算值/%	谐波对基波的百分比实验值/%
7	0.9	0.9	1.0	1.0
11	0.7	0.5	0.4	0.7
13	0.5	0.4	0.4	0.5
17	0.2	0.2	0.7	0.2
19	0.1	0.3	0.5	0.4
23	0.2	0.3	0.1	0.2
29	0.6	0.5	2.2	2.0
31	1.2	1.8	2.9	2.0

由图3和图4可知,当齿谐波励磁系统接通后,励磁电压和励磁电流脉动较大,其中励磁电流的交流分量产生的附加磁场在电枢绕组中感应  $2Z_1/p - 1 =$

29次和  $2Z_1/p + 1 = 31$ 次谐波电动势,与励磁磁动势作用在定子齿谐波磁导上产生的齿谐波磁场在电枢绕组中感应的29次和31次齿谐波电动势次数相同,使得波形畸变更严重,如图5所示,与理论分析吻合。

为了减小励磁电流的脉动,在齿谐波励磁系统的直流侧并联了一个  $1000 \mu\text{F}$  的电容。图6是齿谐波励磁系统直流侧并联电容后励磁电压和励磁电流计算波形;图7是齿谐波励磁系统直流侧并联电容后电枢绕组空载线电压计算波形和实验波形;表2是齿谐波励磁系统直流侧并联电容后电枢绕组空载线电压波形中主要的谐波分量对基波的百分比值。

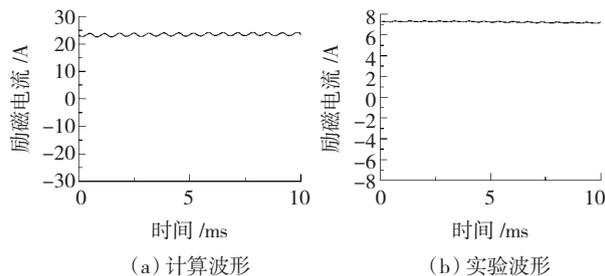


图6 齿谐波励磁系统直流侧并联电容后的励磁电压和励磁电流计算波形

Fig. 6 Calculated waveform of field voltage and field current when tooth harmonic excitation system shunt capacitance in the DC side

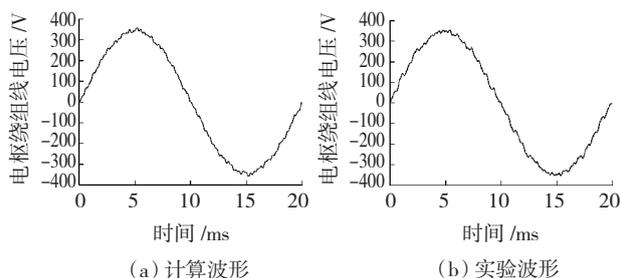


图7 齿谐波励磁系统直流侧并联电容后电枢绕组空载线电压波形

Fig. 7 No-load line voltage waveform of the armature windings when tooth harmonic excitation system shunt capacitance in the DC side

当齿谐波励磁系统直流侧并联电容后,励磁电压脉动较小,励磁电流基本为一恒定直流,如图6所示,从而在很大程度上削弱了其产生的附加磁场,因而29次和31次谐波电动势减小,如表2所示,电枢绕组线电压波形也得到了较大的改善,如图7所示,其波形畸变率计算值为2.4%,从而验证了理论分析的正确性。

表2 齿谐波励磁系统直流侧并联电容后电枢绕组空载线电压波形中主要的谐波分量对基波的百分比值

Table 2 The percentage of the main harmonic to the fundamental of the no-load line voltage waveform of the armature winding when tooth harmonic excitation system shunt capacitance in the DC side

谐波次数	谐波对基波的百分比计算值/%	谐波对基波的百分比实验值/%
7	1.0	1.0
11	0.4	0.8
13	0.5	0.6
17	0.8	0.7
19	0.7	0.8
23	0.1	0.2
29	0.2	0.2
31	1.2	1.7

## 4 结 语

针对齿谐波励磁系统输出的励磁电流产生脉动的原因以及该脉动电流产生的附加磁场在电枢绕组中感应谐波电动势的特点进行了详细的分析。计算结果和实验结果比较表明:采用在齿谐波励磁系统的直流侧并联电容的方法可以削弱励磁电流的脉动,从而减小其产生的附加磁场对电枢绕组空载线电压波形的影响。

### 参 考 文 献:

[1] 张岳,王凤翔. 直驱永磁同步风力发电机性能研究[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 78-82.  
ZHANG Yue, WANG Fengxiang. Performance research on permanent magnet synchronous generator directly driven by wind turbine [J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 78-82.

[2] WANG Aimeng, JIA Yihua, SOONG W L. Comparison of five topologies for an interior permanent-magnet machine for a hybrid e-

lectric vehicle [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3606-3609.

- [3] KOLONDOZOVSKI Z, ARKKIO A, LARJOLA J, et al. Power limits of high-speed permanent-magnet electrical machines for compressor applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(1): 73-82.
- [4] THOMAS A S, ZHU Z Q, OWEN R L, et al. Multiphase flux-switching permanent-magnet brushless machine for aerospace application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(6): 1971-1981.
- [5] 夏永洪,王善铭,黄劭刚,等. 齿谐波励磁的混合励磁永磁同步发电机[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2011, 51(11): 1647-1651.  
XIA Yonghong, WANG Shanming, HUANG Shaogang, et al. Hybrid excitation permanent magnet synchronous generator utilizing tooth harmonic for excitation [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(11): 1647-1651.
- [6] 夏永洪,王善铭,黄劭刚,等. 齿谐波绕组感应电动势波形快速计算[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(9): 1-5.  
XIA Yonghong, WANG Shanming, HUANG Shaogang, et al. Fast calculation of the induced EMF waveform of the tooth harmonic windings [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(9): 1-5.
- [7] 夏永洪,王善铭,邱阿瑞,等. 新型混合励磁永磁同步电机齿谐波电动势的协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 56-61.  
XIA Yonghong, WANG Shanming, QIU Arui, et al. Coordinated control of tooth harmonic emf of novel hybrid excitation permanent magnet synchronous machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 56-61.
- [8] OUAZIR Y, TAKORABET N, IBTIOUEN R, et al. Time-stepping FE analysis of cage induction motor with air-gap interface coupling taking into account phase-belt harmonics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1384-1387.
- [9] JABBAR M A, LIU Zhejie, DONG Jing. Time-stepping finite-element analysis for the dynamic performance of a permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(5): 2621-2623.
- [10] 陈世坤. 电机设计 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 1990: 50-63.

(编辑:张诗阁)