

文章编号:1674-2974(2016)10-0087-07

## SVPWM 调制策略下永磁同步发电机损耗分析\*

张越雷,高 剑<sup>†</sup>,黄守道,彭 婧,荣 飞

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

**摘 要:**永磁同步发电系统中,发电机与 PWM 变流器直接相连,使永磁同步发电机谐波损耗增大,甚至会导致永磁材料不可逆去磁.针对该问题,本文利用 AnSoft 联合仿真研究了基于矢量控制的 SVPWM 调制策略下,设置不同调制比与载波频率对永磁同步发电机铜耗、铁耗及转子损耗的影响,并深入分析了损耗随调制比与载波频率变化的规律.仿真结果表明:SVPWM 调制策略下的 PMSG-PWM 系统中,载波频率一定时,随着调制比的增大,永磁同步发电机铜耗、铁耗及转子损耗逐渐减小,且调制比每增加 0.1 对发电机铜耗的影响最大;调制比一定时,永磁同步发电机的铜耗、铁耗及转子损耗也逐渐减小,但载波频率每增加 1 kHz,对发电机铁耗及转子损耗的影响最大.研究结果为 SVPWM 调制策略下设定合理的调制比与载波频率以保障永磁同步发电机的安全运行提供了参考.

**关键词:**永磁同步发电机;空间矢量脉宽调制;调制比;载波比;谐波损耗

**中图分类号:**TM315

**文献标识码:**A

## Stator Losses of Permanent Magnet Synchronous Generator under SVPWM Modulation

ZHANG Yue-lei, GAO Jian<sup>†</sup>, HUANG Shou-dao, PENG Jing, RONG Fei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Permanent magnet synchronous generator is directly connected with PWM converter in the wind power system based on direct-driven permanent magnet synchronous generator, which results in the increase of the stator losses of the permanent magnet synchronous generator, and even leads to the irreversible demagnetization of permanent magnet materials. To solve this problem, this paper analyzed the influence of amplitude modulation ratio and frequency modulation ratio on eddy current losses and stator losses of permanent magnet synchronous generator under SVPWM modulation. Finally, this paper compared the results of AnSoft simulation and Fourier analysis with the results obtained from the calculation models of this paper, which verifies the correctness of the calculation model proposed. The calculation models presented have reference value for setting proper amplitude modulation ratio and frequency modulation ratio under SVPWM modulation. This can ensure the safe operation of the permanent magnet synchronous generator.

**Key words:** PMSG; SVPWM; amplitude modulation ratio; frequency modulation ratio; harmonic losses

\* 收稿日期:2016-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407065), National Natural Science Foundation of China(51407065);湖南省科技计划项目(2015GK3012)

作者简介:张越雷(1971-),男,湖南湘潭人,湖南大学博士研究生

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: gaojian0895@hnu.edu.cn

永磁同步发电机具有效率高、维护方便、控制性能优越等优点<sup>[1-2]</sup>。因此,直驱式永磁同步发电技术逐渐成为余热发电、测量传动等领域研究的焦点并得到广泛应用。

但对于直驱式永磁同步风力发电系统而言,永磁发电机与PWM变流器直接相连,使永磁同步发电机谐波含量增大,引起永磁同步发电机发热,甚至会导致永磁材料不可逆去磁<sup>[3-4]</sup>。因此对永磁同步发电机损耗的研究变得越来越重要。

文献[5]分析了电机控制策略对电机损耗的影响,并提出矢量控制可以减小电机的损耗。文献[6-7]在此基础上,对基于 $i_d=0$ 矢量控制下永磁电机的损耗进行了分析,提出 $i_d=0$ 控制中 $i_d$ 值与永磁电机的损耗大小之间的关系。文献[8]同时兼顾矢量控制和电机损耗,对基于 $i_d=0$ 矢量控制下永磁电机运行不同工况下的各区域损耗进行有限元分析。上述文献具有较强的工程实用性,但文献均没有考虑矢量控制中调制参数对永磁同步发电机损耗的影响。

PWM调制会在电机中产生较大的谐波电流,从而使得电机定子磁动势中的时间谐波增大,产生很多相对于定子以不同速度旋转的谐波磁场,导致定子铁心损耗增加。因此,对SVPWM调制下谐波分析是必要的。本文在上述文献的研究基础上,分析了基于矢量控制的SVPWM调制策略下,调制比与载波频率对永磁同步发电机各区域损耗的影响,并应用AnSoft联合仿真对SVPWM调制策略下调制比与载波频率对永磁同步发电机谐波损耗影响的规律进行了研究。最后搭建了实验平台,将实验结果与AnSoft联合仿真进行有限元数值计算的结果进行了对比,验证了本文仿真结论的正确性。

## 1 系统结构及采样原理分析

### 1.1 PMSG-PWM变流器主电路结构

PMSG-PWM变流器主电路结构<sup>[9]</sup>如图1所示。图中, $e_{sa}$ 、 $e_{sb}$ 和 $e_{sc}$ 为PMSG转子磁链感应电动势, $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 和 $i_{sc}$ 为三相定子电流, $R_s$ 为定子电阻, $L_s$ 为定子电感与外串滤波电感的等效电感, $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 和 $u_{sc}$ 为变流器相电压。 $V_1 \sim V_6$ 为功率开关器件IGBT, $C$ 为直流母线侧电容, $E_d$ 为直流母线电压。

### 1.2 SVPWM采样原理

以A相为例,SVPWM的等效采样过程<sup>[10]</sup>如图2

所示,其中 $\theta_1 = -\frac{\pi(1+y(t))}{2}$ , $\theta_2 = \frac{\pi(1+y(t))}{2}$ , $y(t)$ 为调制波,载波 $U_c$ 为频率为 $\omega_s$ ,幅值为1的三角波。

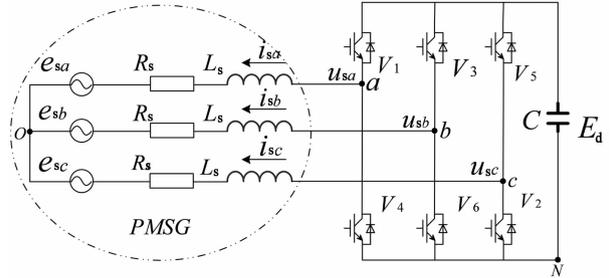


图1 PMSG-PWM变流器主电路结构  
Fig. 1 Inverter main circuit structure of PMSG-PWM

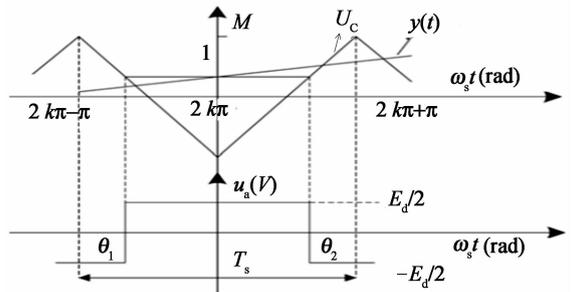


图2 SVPWM的采样过程等效图  
Fig. 2 Sampling process of SVPWM

调制函数表达式为<sup>[11]</sup>:

$$y(t) = \begin{cases} \sqrt{3}a \sin(\omega_1 t), & 0 \leq \omega_1 t \leq \frac{\pi}{6}; \\ a \sin(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}), & \frac{\pi}{6} \leq \omega_1 t \leq \frac{\pi}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a$ 为调制系数, $0 \leq a \leq 1$ , $y(t)$ 经傅里叶分解为

$$y(t) = a \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\omega_1 t) + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{6 \times (-1)^{m+1}}{\pi(1-m^2)} \sin(n\omega_1 t) \right]. \quad (2)$$

式中: $m=6n+3, n=0,1,2 \dots$ 。当 $n \geq 1$ 时,相对基波幅值而言,谐波幅值很小,可以忽略不计。因此,SVPWM的调制函数 $y(t)$ 等价于含有一定三次谐波含量的正弦波,将 $n=1$ 即 $m=3$ 带入式(2),可得 $y(t)$ 表达式为

$$y(t) \approx \frac{2a}{\sqrt{3}} (\sin(\omega_1 t) + \frac{3\sqrt{3}}{8\pi} \sin(3\omega_1 t)). \quad (3)$$

令调制比 $M = a/\sqrt{3}$ , $\xi = 3\sqrt{3}/8\pi$ ,则式(3)为

$$y(t) \approx M (\sin(\omega_1 t) + \xi \sin(3\omega_1 t)). \quad (4)$$

式中: $\omega_1 = 2\pi f$ ,表示基波角频率。

根据图2可知,A相输出电压为:

$$u_a = \begin{cases} -\frac{E_d}{2}, & \omega_1 t \leq \theta_1; \\ \frac{E_d}{2}, & \theta_1 \leq \omega_1 t \leq \theta_2; \\ -\frac{E_d}{2}, & \omega_1 t \geq \theta_2. \end{cases} \quad (5)$$

在忽略电网电压频率波动, 不计开关管的导通关断延时以及由此产生的死区时间和最小脉宽的影响时, 对  $u_a$  作傅里叶分解得:

$$\frac{u_a}{E_d/2} = a_0 + \sum_{k=1}^N [a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)]. \quad (6)$$

式中:  $b_n=0$ ;  $a_0 = M(\sin(\omega_1 t) + \xi \sin(3\omega_1 t))$ ;

$$a_k = \frac{4}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right) + \frac{Mk\pi}{2} [\sin(\omega_1 t) + \xi \sin(3\omega_1 t)].$$

式(6)表明, PWM 变流器的谐波幅值与谐波次数  $k$ , 直流侧电压  $E_d$ , 调制比  $M$  有关, 而  $E_d$  又与调制比  $M$  有关, 谐波次数  $k$  与调制比  $M$  与载波频率  $f$ . 综上所述, PWM 变流器的谐波幅值与调制比  $M$  与载波频率  $f$  有关. 由于发电机与 PWM 变流器直接相连, 调制比  $M$  与载波频率  $f$  进而影响了 PMSG 谐波损耗.

## 2 永磁同步发电机谐波分析计算模型

### 2.1 永磁同步发电机谐波铜耗计算模型

电机运行时, 定子绕组趋肤效应使导线的有效截面积减小, 从而导致导线的等效电阻增加, 特别是在高频情况下, 导线的电阻会随着频率的增加而显著增加<sup>[10-11]</sup>. 基于矢量控制的 SVPWM 调制策略下, 永磁同步电机谐波频率较高, 为准确计算铜耗, 趋肤效应还应考虑不同频率下的电阻增加系数. 因此, 永磁同步发电机谐波铜耗为<sup>[12]</sup>:

$$P_{Cu} = \sum_{k=1}^N I_k^2 (K_k R_{dc}). \quad (7)$$

式中:  $R_{dc}$  单位长导体的直流电阻,  $R_{dc} = 1/\pi h^2 \delta$ ;  $h$  为定子扁铜线的高度;  $\delta$  为导体的趋肤深度.  $K_k$  为  $k$  次谐波引起的趋肤效应电阻增加系数,  $K_k = R_{kac}/R_{dc}$ ,  $R_{kac}$  为单位长度导体的交流电阻.

设定子槽内绕组由  $m$  根单位长度导体串联构成, 则  $K_k$  为:

$$K_k = \frac{R_{kac}}{R_{dc}} = \varphi_{(\xi)} + \frac{m^2}{3} \psi_{(\xi)}. \quad (8)$$

式中:  $\varphi_{(\xi)} = \xi_k \frac{\text{sh}2\xi_k + \sin 2\xi_k}{\text{ch}2\xi_k - \sin 2\xi_k}$ ;  $\psi_{(\xi)} = \xi_k$

$\frac{\text{sh}2\xi_k - \sin 2\xi_k}{\text{ch}2\xi_k + \sin 2\xi_k} \xi_k = a \times \sqrt{\frac{h}{b_s} \frac{u_0 \pi f_k}{\rho}}$ ;  $b$  为定子扁铜线的宽度;  $b_s$  为定子槽宽.

### 2.2 永磁同步发电机谐波铁耗计算模型

根据 Bertotti 的交变损耗分立模型, 正弦交变磁场在硅钢片中产生的铁心损耗表示为<sup>[13]</sup>:

$$p_{Fe} = p_e + p_n + p_a. \quad (9)$$

式中:  $p_e$  为涡流损耗;  $p_n$  为磁滞损耗;  $p_a$  为附加损耗. 参考文献[14]采用二维有限元法计算涡流损耗、磁滞损耗、附加损耗, 具体为:

$$\begin{cases} p_e = \sum_{k=1}^N p_{ek} = \sum_{k=1}^N k_e (B_k f_k)^2, \\ p_n = \sum_{k=1}^N p_{nk} = \sum_{k=1}^N k_n B_k^2 f_k, \\ p_a = \sum_{k=1}^N p_{ak} = \sum_{k=1}^N k_a (B_k f_k)^{\frac{3}{2}}. \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $f_k$  为  $k$  次谐波磁密的频率;  $N$  为谐波次数, 本文  $N=100$ ;  $k_e$  为涡流损耗系数;  $k_n$  为磁滞损耗系数;  $k_a$  为附加损耗系数.

### 2.3 永磁同步发电机转子涡流损耗计算模型

基于矢量控制的 SVPWM 调制策略下, 永磁同步电机谐波频率较高, 在转子中产生的涡流损耗也较大, 因此转子涡流损耗的准确计算对于保证电机性能和可靠性都显得尤为重要. 当电机长径较小时, 为准确计算转子涡流损耗, 还必须考虑涡流的端部效应, 即同时考虑转子涡流的轴向分量与周向分量.

根据坡印廷原理, 进入保护套的平均功率为<sup>[15]</sup>:

$$\overline{P_s} = -\frac{skp^2 \omega_r \tau L_a}{u_s} R_e (jC_s D_s^* \lambda_s^*), \quad (11)$$

式中:  $\omega_r$  为转子旋转速度;  $s$  为  $k$  次时间谐波  $v$  次空间谐波的转差率, 当谐波旋转方向与转子旋转方向相同时,  $s = 1 - \frac{v}{kp}$ , 当谐波旋转方向与转子旋转方向相反时,  $s = 1 + \frac{v}{kp}$ ;  $\lambda_s = \sqrt{a^2 + jskp\omega_r u_s \delta_s}$ ;  $u_s$  为保护套磁导率,  $\delta_s$  为保护套电导率.

同理可得, 进入永磁体的平均功率为:

$$\overline{P_M} = -\frac{skp^2 \omega_r \tau L_a}{u_M} R_e (j\lambda_4^* C_M \text{ch}\lambda_M l - D_M \text{sh}\lambda_M l) (D_M \text{ch}\lambda_M l - C_M \text{sh}\lambda_M l). \quad (12)$$

式中:  $\lambda_M = \sqrt{a^2 + jskp\omega_r u_M \delta_M}$ ,  $u_M$  为永磁体磁导率,  $\delta_M$  为永磁体电导率.

同理可得,进入转子轭部的平均功率为:

$$\overline{P}_H = -\frac{skp^2\omega_r\tau L_a}{u_3} R_e(jC_s\lambda_H^* C_H^* e^{-(\lambda_H+\lambda_H^*)(l+m)}), \quad (13)$$

式中:  $\lambda_H = \sqrt{a^2 + jskp\omega_r u_H \delta_H}$ ,  $u_H$  为转子轭部磁导率;  $\delta_H$  为转子轭部电导率.

因此,  $k$  次时间谐波、 $v$  次空间谐波电流在保护套涡流损耗  $P_S^{kv}$ , 永磁体涡流损耗  $P_M^{kv}$ , 转子轭中涡流损耗  $P_H^{kv}$  为:

$$\begin{cases} P_S^{kv} = \overline{P}_S - \overline{P}_M, \\ P_M^{kv} = \overline{P}_M - \overline{P}_H, \\ P_S^{kv} = \overline{P}_H. \end{cases} \quad (14)$$

由于永磁同步电机转子涡流损耗的求解与实心转子异步电机阻抗的求解具有相同的本质,因此本文引用实心转子异步电机的端部系数来考虑永磁同步电机的端部效应的影响,永磁体涡流损耗  $P_M$  与转子铁心损耗  $P_H$  为:

$$\begin{cases} P_M = K_e \sum_{k=1}^N \sum_{v=1}^N P_S^{kv}, \\ P_H = K_e \sum_{k=1}^N \sum_{v=1}^N P_H^{kv}. \end{cases} \quad (15)$$

### 3 SVPWM 调制下发电机损耗分析

#### 3.1 仿真参数及 AnSoft 有限元模型

本文分析的永磁电机参数如表 1 所示,由于电机磁场呈周期性变换,为了研究 SVPWM 调制下设置不同调制比与载波频率时,永磁同步电机损耗变化规律及所占比例,本文采用有限元分析软件建立电机的 1/8 模型进行分析,模型如图 3 所示.

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameters

参数名称	参数值
发电机额定功率 $P_e/kW$	840
发电机额定转速 $\omega/(r \cdot \min^{-1})$	4 200
发电机电极对数 $p$	4
定子电阻 $R/\Omega$	0.001 3
槽数	72
铁心材料	35W300
永磁体牌号	Smco8

为了研究 SVPWM 调制下设置不同调制比与载波频率时,永磁同步电机定子铁心各区域损耗的变化规律,本文对电机铁心进行区域划分,将其分为齿顶、齿身、齿根、齿轭 4 部分,其模型如图 4 所示.

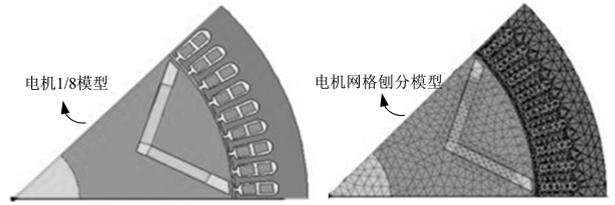


图 3 永磁同步电机有限元模型图及网络剖分图  
Fig. 3 Model of FEM calculation

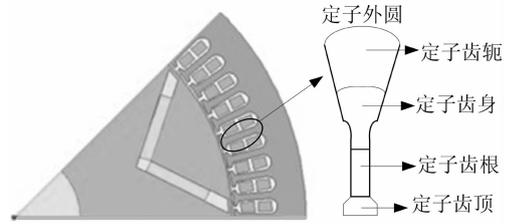


图 4 永磁同步电机定子区域图  
Fig. 4 Distribution and subdivision of permanent magnet synchronous motor stator

设置不同调制比与载波频率时永磁同步电机铁耗分布云图如图 5 所示.

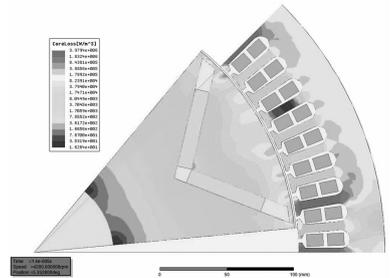


图 5 永磁同步电机铁耗分布云图  
Fig. 5 Iron loss distribution nephogram of permanent magnet synchronous motor stator

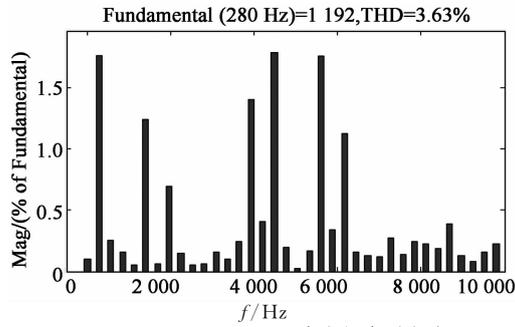
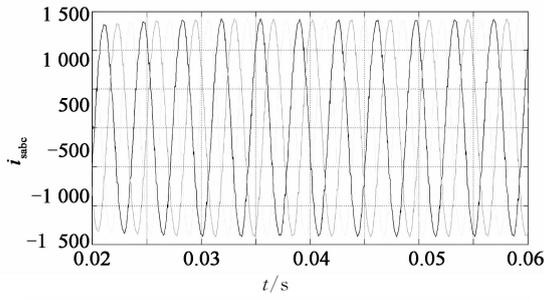
根据上述仿真参数及模型,分别计算  $f = 5$  kHz,  $M = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  及  $M = 0.85, f = 3$  kHz, 4 kHz, 5 kHz 几种情况下永磁同步发电机定子电流,铁耗、铜耗及转子铁心损耗与涡流损耗,并研究了损耗随调制比与载波频率的变化规律.

#### 3.2 调制比对谐波损耗的影响

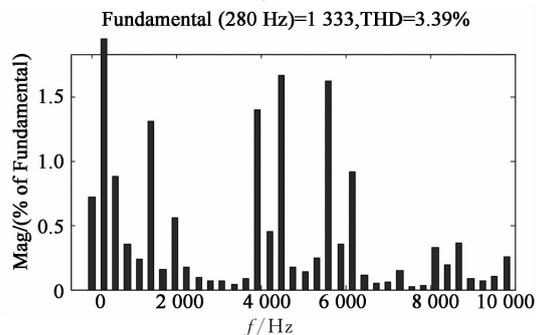
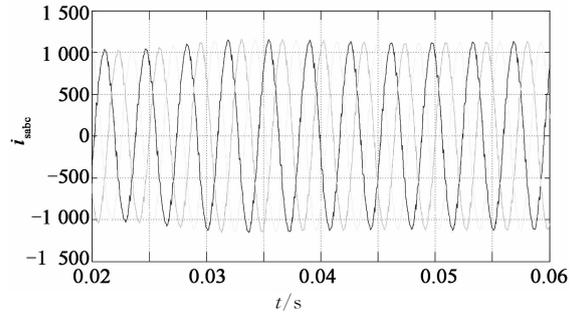
直驱式永磁风力发电系统中,为保证机侧整流器采用 SVPWM 调制时处于线性可调制状态,则机组直流母线电压  $E_{dc}$  与发电机线电压幅值  $U_g$  之间必须满足以下关系<sup>[13]</sup>

$$M \times E_{dc} \geq U_g. \quad (15)$$

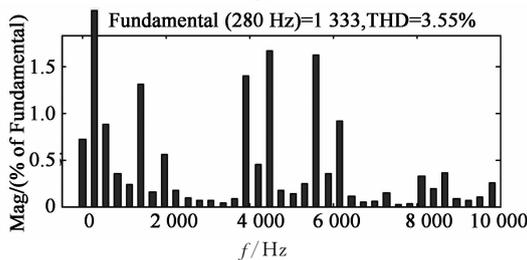
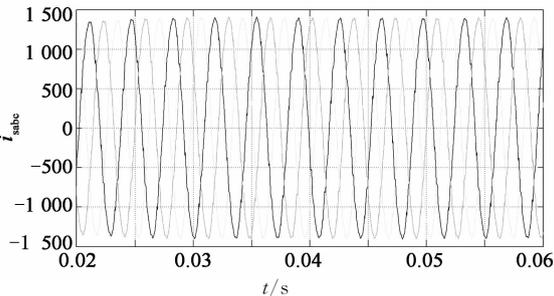
保持载波频率  $f = 5$  kHz 不变,  $M = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  不同情况下,发电机定子电流及 FFT 电流畸变率分析结果如图 6 所示.



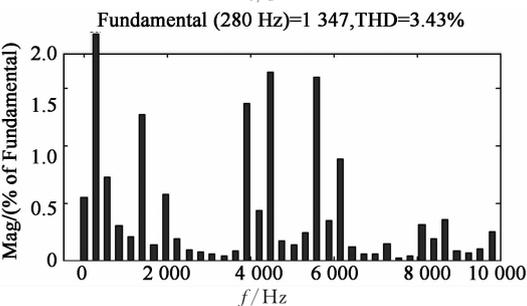
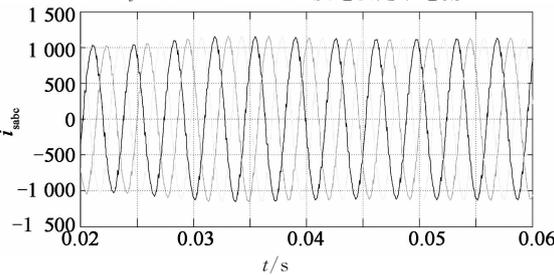
(a)  $f=5$  kHz,  $M=0.6$  发电机定子电流



(d)  $f=5$  kHz,  $M=0.9$  发电机定子电流



(b)  $f=5$  kHz,  $M=0.7$  发电机定子电流



(c)  $f=5$  kHz,  $M=0.8$  发电机定子电流

图 6 不同调制比下发电机定子电流

Fig. 6 Motor stator current under different modulation ratio

对比图 6(a)~(d), 根据定子电流波形及损耗随  $M=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  变化的规律可以看出, 随着调制比的增大, 发电机定子电流的幅值逐渐减小, 发电机定子电流畸变率也略有减小, 但调制比变化主要影响发电机定子电流的幅值, 而对电流的畸变率的影响很小。

保持载波频率  $f=5$  kHz 不变, 分别设定不同的调制比  $M=0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ , 利用 AnSoft 计算发电机损耗的结果如表 2 所示。

表 2 不同调制比下损耗数据

Tab. 2 Percentage of stator iron losses for different m

调制比	$M=0.6$	$M=0.7$	$M=0.8$	$M=0.9$
定子铁耗/kW	8.25	8.17	8.10	8.01
铜耗/kW	12.64	12.49	12.32	12.17
永磁体涡流损耗/kW	0.97	0.85	0.76	0.67
转子铁心损耗/kW	3.44	3.32	3.28	3.16

综合图 6 与表 2 可知, 当载波频率一定时, 随着调制比的增大, 由于发电机定子电流的幅值及畸变率均减小, 因此, 当载波频率一定时, 随着调制比的增大发电机的定子、铜耗、转子损耗也减小。

由图 7 所示不同调制比下损耗分布的情况可知, 发电机铜耗占发电机额定功率的比重最大, 为

1.5%左右. 而综合图 6 与表 7 可知, 由于调制比变化主要影响发电机定子电流的幅值, 而对电流的畸变率的影响很小. 因此, 图 7 中调制参数  $M$  每增大 0.1 对铜耗的变化最大.

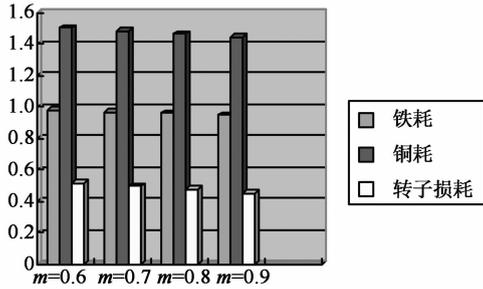


图 7 不同调制比下损耗分布图  
Fig. 7 Motor loss distribution under different modulation

### 3.3 载波频率对谐波损耗的影响

保持载波频率  $M=0.85$  不变, 在  $f=3\text{ kHz}$ ,  $4\text{ kHz}$ ,  $5\text{ kHz}$  不同情况下, 分析了发电机定子电流及 FFT 电流畸变率, 其分析结果如图 8 所示.

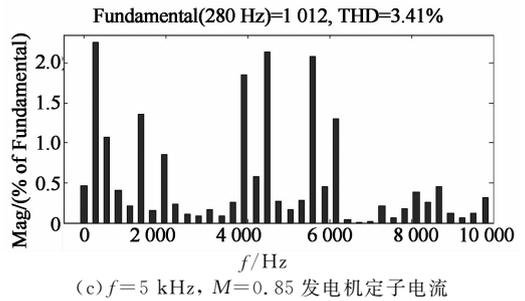
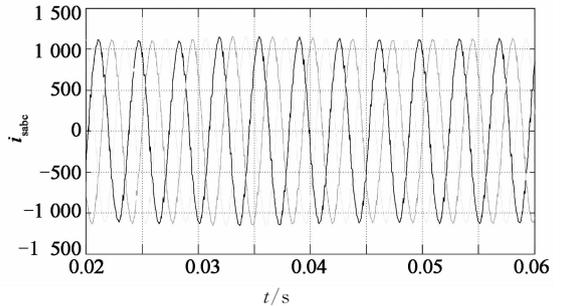
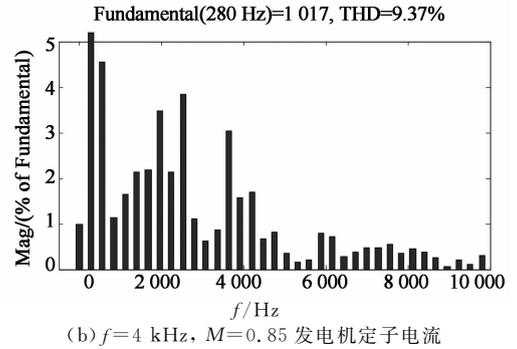


图 8 不同载波频率下发电机定子电流  
Fig. 8 Motor stator current under different frequency

对比图 8(a)~(c)可知, 随着载波频率的增大, 发电机定子电流畸变率增大, 相比图 6, 载波频率变化对发电机定子电流的幅值没有影响.

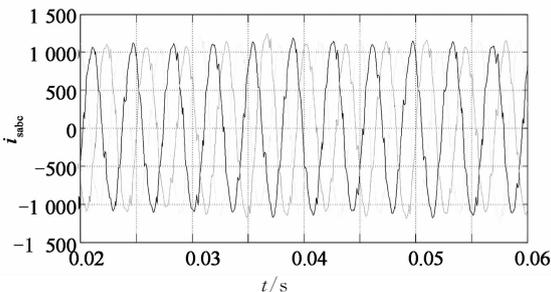
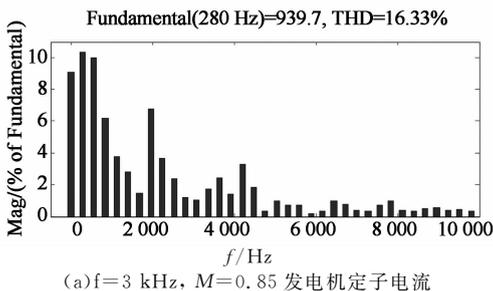
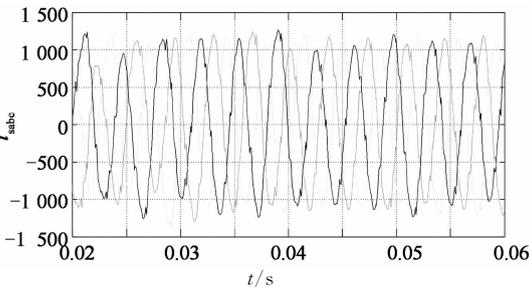
保持调制比  $M=0.85$  不变, 分别选取载波频率  $f=3\text{ kHz}$ ,  $4\text{ kHz}$ ,  $5\text{ kHz}$ , 针对不同的  $f$  取值, 计算电机各部分的损耗, 其结果如表 3 与图 9 所示.

表 3 不同载波频率下损耗的分布

Tab. 3 Percentage of stator iron losses for different  $f$

载波频率	$f=3\text{ kHz}$	$f=4\text{ kHz}$	$f=5\text{ kHz}$
定子铁耗/kW	8.65	8.35	8.04
铜耗/kW	12.41	12.30	12.21
永磁体涡流损耗/kW	1.29	1.05	0.71
转子铁心损耗/kW	4.37	3.86	3.29

综合表 3 与图 9 可知, 当调制比一定时, 随着载波频率的增大, 发电机的定子铁耗、铜耗、转子损耗均减小. 对比  $f=3\text{ kHz}$ ,  $4\text{ kHz}$ ,  $5\text{ kHz}$  不同载波频率下损耗的大小可以看出, 发电机铜耗占发电机额定



功率的比重最大,为 1.4%左右.但由于载波频率主要影响定子电流的畸变率,因此载波频率对定子铁心损耗与转子损耗的影响最大,对铜耗的影响最小.

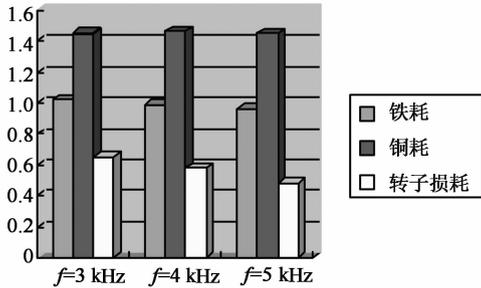


图 9 不同载波频率下损耗分布图

Fig. 9 Motor loss distribution under different frequency

## 4 结 论

本文应用 AnSoft 联合仿真进行有限元数值分析研究了基于矢量控制的 SVPWM 调制策略下,调制比与载波频率对永磁同步发电机各区域损耗的影响.结果表明,调制比与载波频率增大,永磁同步发电机的铁耗、铜耗及转子损耗均减小.当载波频率一定时,调制比每增大 0.1 对发电机铜耗的影响最大;而调制比一定时,载波频率每增加 1 kHz,对发电机铁耗及转子损耗的影响最大.本文的研究结果为 SVPWM 调制策略下设定合理的调制比与载波频率以保障永磁同步发电机的安全提供了参考.

## 参考文献

- [1] DATTA R, RANGANATHAN V T. Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-A comparison with alternative schemes [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(3):414-421.
- [2] 凌禹,张同庄. 变速风力发电系统控制技术综述[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(3):122-125.  
LING Yu, ZHANG Tong-zhuang. Summary of control algorithms for variable-speed wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(3):122-125. (In Chinese)
- [3] FOULADGAR J, CHAUVEAU E. The influence of the harmonics on the temperature of electrical machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5):1644-1647.
- [4] 韩力,谢李丹,张桂娟. 变频器参数对永磁同步发电机定子损耗的影响[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(12): 75-81.  
HAN Li, XIE Li-dan, ZHANG Gui-juan. Influence of converter parameters on stator losses of permanent magnet synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(12): 75-81. (In Chinese)
- [5] YAMAZAKI K, ABE A. Loss analysis of interior permanent magnet motors considering carrier harmonics and magnet eddy currents using 3-D FEM [C]//Electric Machines and Drives Conference, 2007:905-909.
- [6] 邹继斌,李建军,徐永向,等. 驱动方式对永磁无刷直流电机损耗的影响 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 44-47.  
ZOU Ji-bin, LI Jian-jun, XU Yong-xiang, et al. Influences of drive strategies on the loss of permanent magnet brushless direct current motor [J]. Transaction of China Electro Electro-technical, 2011, 26(9): 44-47. (In Chinese)
- [7] MADEMLIS C, MARGARIS N. Loss minimization in vector-controlled interior permanent magnet synchronous Motor-drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(6),1343-1347.
- [8] 伶文明,朱晓锋,贾建国,等. 时间谐波对永磁同步电机损耗的影响规律[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6):60-69.  
TONG Wen-ming, ZHU Xiao-feng, JIA Jian-guo, et al. Influence law of additional losses induced by time harmonic in permanent magnet synchronous motors [J]. Transaction of China electro Electrotechnical, 2015, 30(6):60-69. (In Chinese)
- [9] TOMMASO A, MICELI R. Efficiency control for permanent-magnet synchronous generators[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology MumbaiIndia2006.
- [10] 孙立. 基于 DSP 的 SVPWM 逆变器的研究[D]. 贵州:贵州大学电气工程学院, 2006.  
SUN Li. Research of SVPWM converter based on DSP [D]. Guizhou: Guizhou University, 2006. (In Chinese)
- [11] 杨贵杰,孙力,崔乃政,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 79-83.  
YANG Gui-jie, SUN Li, CUI Nai-zheng, et al. Study on method of thespace vector PWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 79-83. (In Chinese)
- [12] 胡茄,罗应立,李志强,等. 永磁电动机不同运行条件下的损耗研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 13(1):11-16.  
HU Jia, LUO Ying-li, LI Zhi-qiang, et al. Investigation of losses permanent magnet synchronous motor under different operation conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 13(1):11-16. (In Chinese)
- [13] 黄平林,胡虔生,崔杨,等. PWM 逆变器供电下电机铁心损耗的解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 19-23.  
HUANG Ping-lin, HU Qian-sheng, CUI Yang, et al. Analytical calculation of the iron losses of electric machine fed by PWM inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 19-23. (In Chinese)
- [14] BOGLIETTI A, Andrea CAVAGNINO A, Dan M IONEL D M. A general model to predict the iron losses in PWM inverter fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5): 1882-1890.
- [15] 周凤争. 高速永磁无刷直流电机转子涡流损耗的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.