

基于空间电压矢量调制的定子双绕组 感应发电机系统电压控制技术

李 勇, 胡育文, 黄文新, 邱景峰, 陈光辉, 郝振洋

(航空电源航空科技重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 210016)

Voltage Control of Dual Stator-winding Induction Generator System Using Space Vector Modulation

LI Yong, HU Yu-wen, HUANG Wen-xin, QIU Jing-feng, CHEN Guang-hui, HAO Zhen-yang
(Aero-Power Science-Technology Center (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A novel dual stator-winding induction generator (DWIG) system is described. The proposed DWIG consists of a standard squirrel-cage and a stator with two separate windings wound for the same number of poles, one of which powers the load and the other is fed by the static excitation controller (SEC). Based on the mathematic analysis of the SEC, a decoupling control strategy of the DWIG system using space vector modulation (SVM) is proposed to raise the utilization rate of the SEC's DC voltage and meanwhile eliminate the harmonic currents. The classic working pattern of the system, involving the voltage building-up process, step load changes are carried out on the simulation and experimental platforms. Further studies reveal that the proposed generating system is well suited for the variable-speed operation, and a novel admittance method is employed to analyze the behavior of the SEC. The theory is confirmed by the experimental results.

KEY WORDS: dual stator-winding induction generator; autonomous generating system; static excitation controller; space vector modulation; nodal admittance; variable speed operation

摘要: 将空间电压矢量调制(space vector modulation, SVM)策略应用于定子双绕组感应发电机(dual stator-winding induction generator, DWIG)系统, 不仅提高了直流母线利用率、降低了控制绕组侧静止励磁控制器(static excitation controller, SEC)的直流母线电压, 而且有效降低了控制绕组电流谐波。该文在分析 SEC 数学模型的基础上, 提出基于 SVM 的 DWIG 发电系统电压解耦控制策略, 并对 DWIG 系统建压、突加突卸负载进行了仿真和实验研究, 结果证明该

控制策略具有良好的动静态性能。该文进一步拓展了 SVM 控制下的发电机转速运行范围, 并用节点导纳法对该变速运行过程中的电压和电流关系进行了定量分析, 实验结果验证了该方法的正确性。

关键词: 定子双绕组感应发电机; 独立供电系统; 静止励磁控制器; 空间电压矢量调制; 节点导纳; 变速运行

0 引言

定子双绕组感应发电机(DWIG)系统是 21 世纪初出现的新型异步电机发电系统, 其独特的优点逐渐受到学者的关注^[1-8], 并在新型舰船动力平台、移动通讯、石油钻井平台等独立供电系统中得到研究和应用。目前 DWIG 发电系统控制绕组普遍采用电压型静止励磁控制器(SEC), 通过对 SEC 直流母线电压进行斩波控制来得到所需的控制绕组电流, 其调制策略大都采用正弦脉宽调制(SPWM)和滞环 PWM 技术。SPWM 可用模拟电路实现, 但易受到硬件电路的参数影响, 集成度低, 设计不灵活; 而采用规则采样等数字化实现方法又受到处理器性能的限制, 很难兼顾同时提高调制频率和调制精度的双重要求^[9]。滞环 PWM 具有良好的稳定性和快速性, 易于数字化实现, 在逆变电源和调速系统中应用广泛^[10-11]。但该方案的主要不足是功率器件的开关频率随电流变化率的变化而波动^[11], 增加了滤波电感的设计难度。

空间电压矢量调制(SVM)具有直流电压利用率高、谐波含量少、开关频率固定、易于数字化实现等优点, 在业界应用广泛^[11-13], 但针对 DWIG 发电系统的研究和应用却是一个空白。本文对 SVM 调制策略在 DWIG 发电系统中的应用进行了深入研究,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50577032); 航空科学基金项目(04F52039)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50577032).

在分析SEC数学模型的基础上，提出了基于SVM的DWIG发电系统电压解耦控制策略，在该控制策略的仿真和实验基础上进一步拓展了发电机的转速范围，并利用节点导纳法分析了变速运行过程中控制绕组电压和电流的定量关系。

1 定子双绕组感应发电机数学模型

DWIG 系统结构框图如图 1 所示，功率绕组可接三相阻性负载，如飞机中的加热器等对频率不敏感的用电设备或经过整流桥后接直流负载，也可再经逆变后馈入交流电网，如风力、水力等可再生能源发电系统。本文着重研究功率绕组接整流桥负载输出 270 V 直流电的独立供电系统。

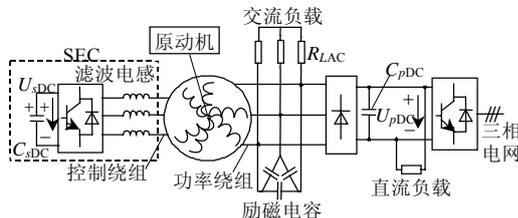


图 1 定子双绕组感应发电机系统结构框图
Fig. 1 Diagram of the DWIG system

为了简化分析，忽略DWIG内部的磁滞损耗和涡流损耗，按照电动机惯例，可得DWIG的数学模型^[1]。电压方程为

$$\begin{cases} u_p = R_p i_p + j\omega_1 \psi_p + D\psi_p \\ u_s = R_s i_s + j\omega_1 \psi_s + D\psi_s \\ u_r = R_r i_r + j\omega_2 \psi_r + D\psi_r \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_p = L_p i_p + L_{ps} i_s + L_m i_r \\ \psi_s = L_s i_s + L_{ps} i_p + L_m i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_m (i_p + i_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中：下标 p 、 s 、 r 分别表示功率绕组、控制绕组和转子绕组的参数； D 为微分算子； u 、 i 、 ψ 分别为电压、电流和磁链矢量； ω_1 、 ω_2 分别为同步角频率和转差角频率； L_m 为定子与转子间的互感； L_{ps} 为功率绕组和控制绕组的互漏感； L_p 、 L_s 、 L_r 分别为功率绕组、控制绕组和转子的自感， $L_p = L_{lp} + L_{ps} + L_m$ ， $L_s = L_{ls} + L_{ps} + L_m$ ， $L_r = L_{lr} + L_m$ 。由此可得图 2

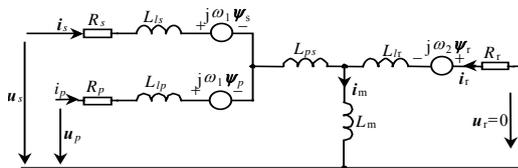


图 2 定子双绕组感应电机 dq 等效电路图
Fig. 2 d - q equivalent circuit of the DWIG

所示的定子双绕组感应发电机 d - q 等效电路图。

2 基于 SVM 的 DWIG 发电系统电压控制策略

按照电动机惯例，不考虑谐波对控制绕组的影响，忽略线路电阻，可以得出DWIG系统控制绕组回路等效模型^[5]，如图 3 所示，图中， U_m 、 i_s 为变换器交流侧电压矢量和电流矢量； L 为滤波电感； U_s 为发电机控制绕组端电压矢量。

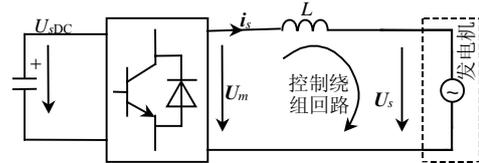


图 3 DWIG 系统控制绕组回路等效模型
Fig. 3 Equivalent model for the DWIG system

图3中控制绕组回路根据基尔霍夫电压定律可得

$$U_m = L di_s / dt + U_s \quad (3)$$

将式(3)分解到静止坐标系中，得

$$\begin{bmatrix} U_{m\alpha} \\ U_{m\beta} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中下标 α 、 β 分别表示相应矢量在静止坐标系中 α 、 β 轴上的分量。由于存在如下变换关系：

$$\begin{bmatrix} U_{md} \\ U_{mq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{m\alpha} \\ U_{m\beta} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta/dq} \begin{bmatrix} U_{m\alpha} \\ U_{m\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此式(4)两边同乘变换矩阵 $C_{\alpha\beta/dq}$ ，则有

$$C_{\alpha\beta/dq} \begin{bmatrix} U_{md} \\ U_{mq} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta/dq} L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + C_{\alpha\beta/dq} \begin{bmatrix} U_{s\alpha} \\ U_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中， $C_{\alpha\beta/dq} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ ， $C_{\alpha\beta/dq}^{-1}$ 为 $C_{\alpha\beta/dq}$ 的逆矩阵， θ 为 d 轴与 α 轴的夹角。下标 d 、 q 分别表示相应矢量在同步旋转坐标系中 d 、 q 轴上的分量。

由式(6)进一步可得

$$\begin{bmatrix} U_{md} \\ U_{mq} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta/dq} L \frac{d}{dt} C_{\alpha\beta/dq}^{-1} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(7)进行化解，可得

$$\begin{bmatrix} U_{md} \\ U_{mq} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + L\omega_1 \begin{bmatrix} -i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} \quad (8)$$

以控制绕组端电压 U_s 定向，如图 4 所示，则有

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中， U_s 为端电压矢量 U_s 的峰值。将式(9)代入式(8)得

$$\begin{bmatrix} U_{md} \\ U_{mq} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + L\omega_1 \begin{bmatrix} -i_{sq} \\ i_{sd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

即

$$U_{md} = L \frac{di_{sd}}{dt} - L\omega_1 i_{sq} + U_s \quad (11)$$

$$U_{mq} = L \frac{di_{sq}}{dt} + L\omega_1 i_{sd} \quad (12)$$

因此有

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{U_{md} + L\omega_1 i_{sq} - U_s}{DL} \\ i_{sq} = \frac{U_{mq} - L\omega_1 i_{sd}}{DL} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)得到 SEC 的数学模型,如图 5 所示。

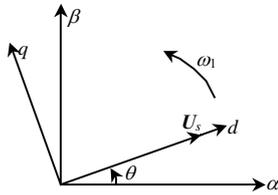


图 4 控制绕组端电压定向

Fig. 4 Oriented by the control winding voltage

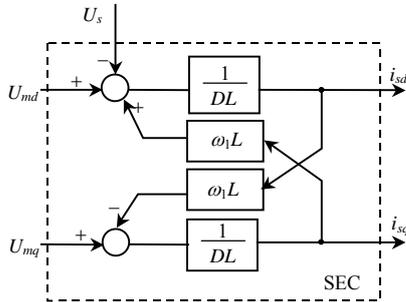


图 5 SEC 的数学模型

Fig. 5 The model for the SEC

可以看出,变换器输出的电压矢量 U_m 和控制绕组端电压 U_s 共同作用到滤波电感 L 上,产生相应的控制绕组电流矢量 $i_s=i_{sd}+ji_{sq}$, i_{sd} 和 i_{sq} 通过控制绕组分别对发电机的有功功率和无功功率进行调节。但 SEC 的 d - q 通道存在严重地交差耦合,为了得到解耦的 SEC 控制策略,引入具有解耦算子的 d - q 通道指令电压 U_{md}^{*de} 和 U_{mq}^{*de} :

$$U_{md}^{*de} = \text{PI}(i_{sd}, i_{sd}^*) - L\omega_1 i_{sq} + U_s \quad (14)$$

$$U_{mq}^{*de} = \text{PI}(i_{sq}, i_{sq}^*) + L\omega_1 i_{sd} \quad (15)$$

将 U_{md}^{*de} 作用到 SEC 的 d 通道上,即将式(14)代入式(15),则有

$$\text{PI}(i_{sd}, i_{sd}^*) - L\omega_1 i_{sq} + U_s = L \frac{di_{sd}}{dt} - L\omega_1 i_{sq} + U_s \quad (16)$$

化简后得

$$\text{PI}(i_{sd}, i_{sd}^*) = L \frac{di_{sd}}{dt} \quad (17)$$

同理,将 U_{mq}^{*de} 作用到 SEC 的 q 通道上,可得

$$\text{PI}(i_{sq}, i_{sq}^*) + L\omega_1 i_{sd} = L \frac{di_{sq}}{dt} + L\omega_1 i_{sd} \quad (18)$$

化简后得

$$\text{PI}(i_{sq}, i_{sq}^*) = L \frac{di_{sq}}{dt} \quad (19)$$

其中, $\text{PI}(x, y) = k_p(x - y) + k_i \int (x - y) dt$ 。

由式(17)、(19)可知,具有解耦算子的 d - q 电压指令 U_{md}^{*de} 和 U_{mq}^{*de} ,只调节各自通道中的电流 i_{sd} 和 i_{sq} ,从而有效消除了 dq 通道的交差耦合。由此可得基于 SVM 的 DWIG 系统电压控制框图,如图 6 所示。图中, U_{sDC} 、 U_{pDC} 分别为 SEC 直流侧电压和功率绕组整流桥直流侧电压;上角标*表示指令值。

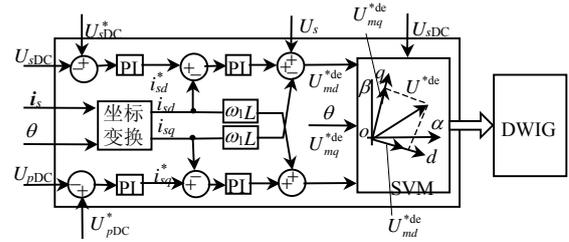


图 6 基于 SVM 的 DWIG 系统电压控制框图

Fig. 6 Voltage control diagram for the DWIG system using SVM

3 系统仿真研究

在 Matlab 仿真环境中用 Simulink 和 SimPower Systems 两个工具箱对系统进行建模仿真,控制周期为 $100 \mu\text{s}$,实验电机参数: $P_N=18 \text{ kW}$, $U_N=115 \text{ V}$ (相电压), $I_N=52.17 \text{ A}$ (相电流), $f_N=130 \text{ Hz}$, $R_p=0.09 \Omega$, $M_{lp}=0.185 \text{ mH}$, $R_r=0.057 \Omega$, $L'_r=0.244 \text{ mH}$, $L_m=6.7 \text{ mH}$, $M'_{ls}=0.3 \text{ mH}$, $R_s=0.039 \Omega$, $M'_{lm}=0 \text{ mH}$; 2 对极;两套绕组均采用 Y 形连接;自励电容 $150 \mu\text{F}$ (每相);整流桥直流侧电容为 $1100 \mu\text{F}/450 \text{ V}$;励磁变换器直流侧电容 $1100 \mu\text{F}/900 \text{ V}$ 。

图 7 为 SVM 控制策略下的 DWIG 系统建压、稳定运行、突加突卸负载等过程的仿真研究。系统在 1% 额定负载下实现建压,0.6 s 时突加 50% 额定负载,0.9 s 时突卸 50% 额定负载。仿真结果表明, SVM 控制算法能够实现系统无超调建压,且具有良好的动态和稳态性能。图 8 为上述过程中 i_{sd} 、 i_{sd}^* 与 i_{sq} 、 i_{sq}^* 的波形,可以看出控制绕组电流的 d - q 分量能准

确跟踪指令电流，表明该控制策略具有良好的解耦特性。

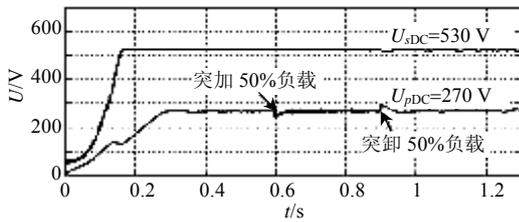
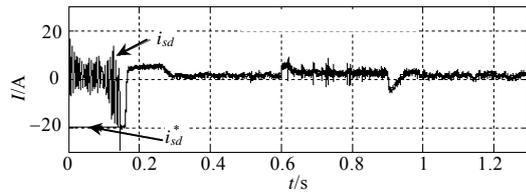
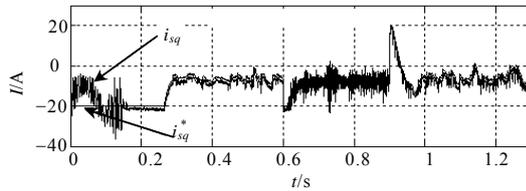


图 7 U_{pDC} 和 U_{sDC} 的仿真波形
Fig. 7 Simulation results of the U_{pDC} and U_{sDC}



(a) i_{sd} 与 i_{sd}^* 的仿真波形



(b) i_{sq} 与 i_{sq}^* 的仿真波形

图 8 控制绕组电流 d - q 轴分量的仿真波形
Fig. 8 Simulation results for the d - q axis components of the control winding currents

4 实验论证

在理论分析和仿真研究的基础上，对本实验室研制的 18 kW 原理样机系统进行了实验验证。选用 IGBT 作为 SEC 的功率开关器件，实时处理器选用 dSPACE DS1104，系统控制周期为 100 μ s。SEC 的滤波电感为 2.7 mH。采用西门子 MM 440 变频器驱动的 20 kW 三相交流异步电机作为发电系统原动机。为了对本文提出的 SVM 控制策略进行评估，建立了 DWIG 发电系统的 SVM 和数字滞环 PWM 两种控制策略，并在相同的实验条件下对两者的实验结果进行比较。

建压是整个系统的起点，这对 DWIG 系统能否顺利投入运行至关重要。图 9 为系统 SVM 控制策略下的建压实验波形，可以看出该策略能够顺利完成系统建压，且系统电压和控制绕组线电流均无冲击。

图 10 为滞环 PWM 和 SVM 两种控制策略下系统轻载(1%额定负载)运行时，控制绕组 A 相线电流 i_{sA} 的实验波形。可见 SVM 控制策略明显改善了控

制绕组电流波形；由于控制绕组电流调节着系统瞬时功率^[14]，并最终影响系统电压，因此控制绕组电流波形的改善必将使系统电压稳态性能得到提高。

图 11、12 为系统轻载时(1%额定负载)的实验波形。图 11 采用了数字滞环 PWM 调制策略，图 11(a)为稳态时 U_{pDC} 与 U_{sDC} 波形，图 11(b)分别为两者的交流脉动 ΔU_{sDC} 和 ΔU_{pDC} ；其中 U_{pDC} 为 270 V，最大脉动为 20 V； U_{sDC} 为 600 V，最大脉动为 10 V。而从图 12 可以看出，SVM 控制策略时 U_{pDC} 为 270 V，但最大脉动降为 2 V； U_{sDC} 为 530 V，最大脉动降为 4 V。由此可见，SVM 控制下的 DWIG 发电系统以较低的直流母线电压实现了系统的稳定运行，且电压脉动大大减小，稳态性能得到提高。

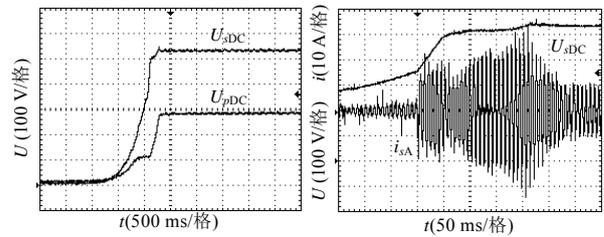


图 9 DWIG 系统 SVM 策略建压实验波形
Fig. 9 Experimental waveforms for the system voltage buildup

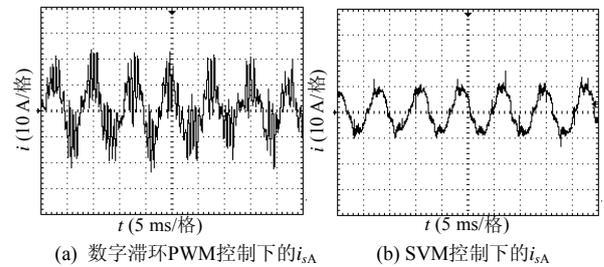


图 10 两种控制策略下控制绕组 A 相线电流 i_{sA} 的实验波形
Fig. 10 Experimental waveforms for the line current i_{sA} of the control winding with different modulation method

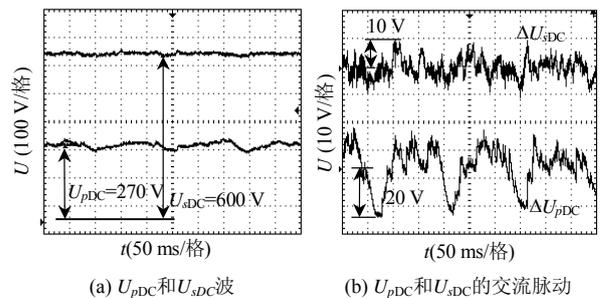


图 11 数字滞环 PWM 控制策略时电压实验波形
Fig. 11 Experimental voltage waveforms using the digital hysteresis PWM strategy

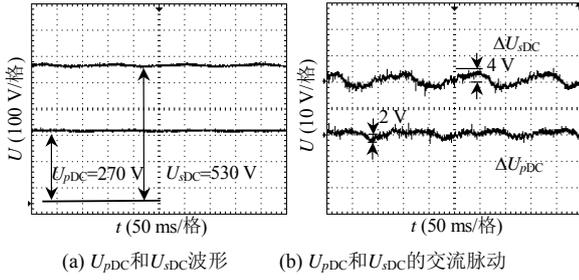


图 12 SVM 控制策略时电压实验波形
Fig. 12 Experimental voltage waveforms using the SVM strategy

图 13 为 SVM 控制下的系统突加、突卸负载过程中 U_{pDC} 和 i_{sA} 的实验波形。1% 额定负载运行时，突加 50% 负载， U_{pDC} 下降 16 V，过渡时间约为 5 ms。突卸过程中电压上升 16 V，过渡时间约为 40 ms。实验与仿真结果基本一致，这表明 SVM 控制下的系统具有良好的动态性能。

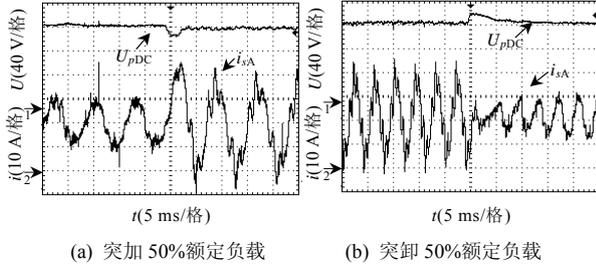


图 13 突加突卸 50% 额定负载时的实验波形
Fig. 13 Experimental waveforms at step change of load

5 SVM 策略控制下的 DWIG 发电系统变速运行

忽略定、转子绕组的漏感和电阻，以突出主要矛盾简化分析过程，可以得到如图 14 所示的稳态相电路模型，电压、电流均采用关联参考方向。SEC 视为一可变电抗^[15] ($X_s = -1/\omega_1 C_s$) 与定、转子互感 L_m 并联。图中 R_L' 为每相等效负载， C 为功率绕组每相励磁电容， C_s 为 SEC 的每相等效电容。

虚线 ab 右侧电路复导纳为

$$Y_{abR} = \frac{1}{jX_c} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{jX_s} + \frac{1}{(1-s)R_r/s} = \frac{s}{(1-s)R_r} + j(\omega_1 C - \frac{1}{\omega_1 L_m} + \omega_1 C_s) \quad (20)$$

式中 s 为转差率。虚线 ab 左侧复导纳为

$$Y_{abL} = \frac{1}{R_L'} \quad (21)$$

根据电路复功率 \tilde{S} 守恒，可得

$$\tilde{S} = U_{ab}^2 (Y_{abR}^* + Y_{abL}^*) = 0 \quad (22)$$

式中 Y_{abR}^* 、 Y_{abL}^* 分别为 Y_{abR} 、 Y_{abL} 的共轭复数。

因为 $U_{ab} \neq 0$ ，所以有

$$\text{Re}(Y_{abR}^* + Y_{abL}^*) = 0 \quad (23)$$

$$\text{Im}(Y_{abR}^* + Y_{abL}^*) = 0 \quad (24)$$

由式(24)可得

$$\omega_1 C - \frac{1}{\omega_1 L_m} + \omega_1 C_s = 0 \quad (25)$$

因此 SEC 的等效电纳 B_s 为

$$B_s = \omega_1 C_s = \frac{1}{\omega_1 L_m} - \omega_1 C \quad (26)$$

当 $B_s > 0$ 时，SEC 呈现容性性质；当 $B_s < 0$ 时，SEC 呈现感性性质。

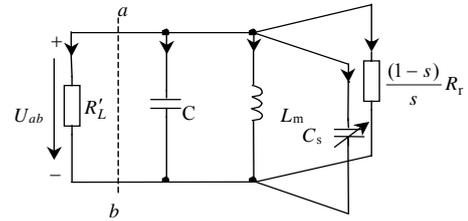


图 14 稳态相电路简化图

Fig. 14 Simplified per-phase equivalent circuit

根据电机参数，由式(26)可得 SEC 等效电纳 B_s 随发电机同步频率 ω_1 的变化趋势，如图 15 所示。在额定转速附近运行时，励磁电容不足以建立发电机所需的磁场，剩余部分需由 SEC 激励，因此 SEC 等效电纳为正，即呈现容性。随着同步频率的增加，SEC 等效电纳经历一个由零变负的过程。当 SEC 等效电纳为负时，表明 SEC 从发电机中抽取多余的励磁无功，对发电机系统进行弱磁控制。

因此发电机变速运行时，SVM 控制策略必须能够根据发电机运行工况，经由控制绕组对发电机磁场进行主动调节。在额定转速以上时，需要对发电机进行弱磁控制，才能够拓展系统转速范围。

图 16 为 SVM 控制下的 DWIG 发电系统在 3 800~6 300 r/min 范围内的变速运行过程中系统电压波形以及 3 个典型阶段控制绕组线电压 U_{sAB} 与 A 相线电流 i_{sA} 的实验波形。需要指明的是，实验中

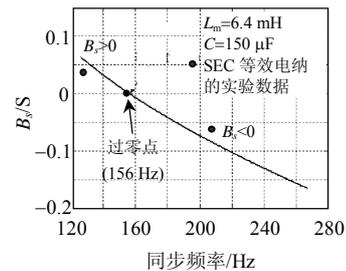


图 15 SEC 等效电纳与同步频率

Fig. 15 SEC equivalent admittance vs. synchronous speed

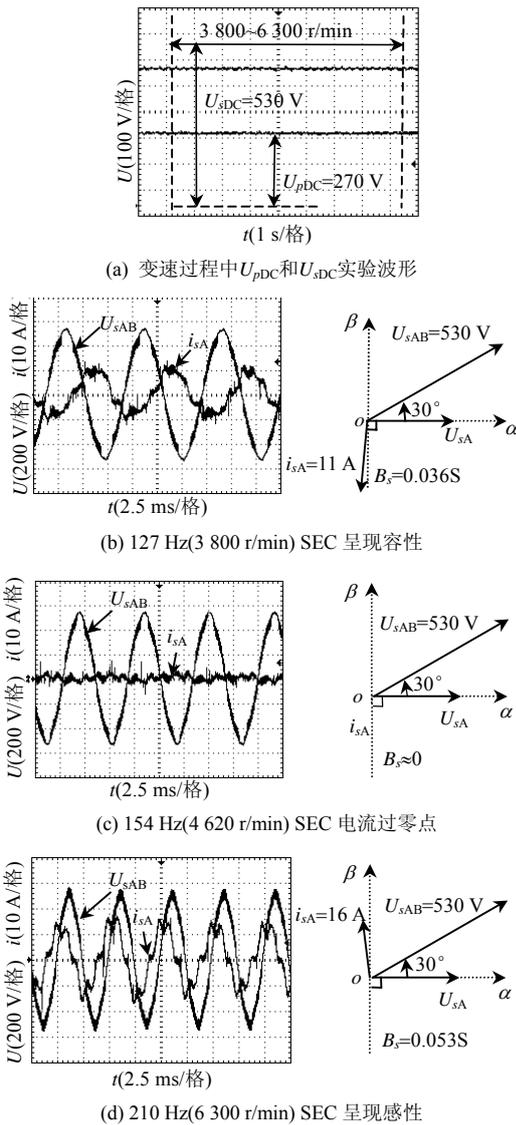


图 16 DWIG 发电系统变速运行的实验波形

Fig. 16 Experimental waveforms for the wide speed operation of the DWIG system

控制绕组 Hall 传感器的参考方向如图 3 所示，即 SEC 采用非关联参考方向。

图 16(a)表明发电系统在额定转速(3 900 r/min)以上运行时，状态稳定，说明SEC能够对发电系统进行弱磁控制。图 16(b)为同步频率为 127 Hz时 U_{sAB} 和 i_{sA} 的实验波形， i_{sA} 滞后 U_{sAB} 约 120° ，表明SEC为发电机提供感性励磁无功。图 16(c)同步频率为 154 Hz时 U_{sAB} 和 i_{sA} 的实验波形，此时SEC电流过零点，不对发电机提供励磁无功。图 16(d)同步频率为 210 Hz时的 U_{sAB} 和 i_{sA} 的实验波形， i_{sA} 超前 U_{sAB} 约 60° ，此时SEC从发电机抽取励磁无功。由此得到相应频率时的SEC等效电纳 B_s ，标注于图 15 中，可以看出理论分析与实验结果基本吻合。以上实验结果说明，SVM控制下的SEC在发电机变速运行时具有对

电机磁场主动调节的能力。

6 结论

在分析 DWIG 发电系统中 SEC 数学模型的基础上，提出了基于 SVM 的控制绕组电压解耦控制策略，仿真和实验结果表明该系统具有如下性能：

(1) SEC 控制下的 DWIG 发电系统能够实现无冲击建压，具有良好的动、静态性能。

(2) 该控制策略有效降低了 SEC 直流母线电压，改善了控制绕组电流波形，对提高 SEC 的可靠性和降低其滤波电感起到了重要作用。

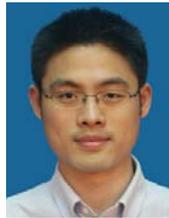
(3) SVM 控制下的 SEC 能够对发电机磁场进行有效调节，使系统在宽转速范围内稳定运行。

基于 SVM 的 DWIG 发电系统的电压控制策略对该新型发电系统的推广和应用具有重要的理论和工程价值。

参考文献

- [1] Olorunfemi Ojo , Innocent Ewean Davidson . PWM-VSI inverter-assisted stand-alone dual stator winding induction generator [J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2000, 36(6): 1604-1611.
- [2] 马伟明. 电力集成技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 16-20. Ma Weiming . Power system integration technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 16-20.
- [3] 王东, 马伟明, 李玉梅, 等. 带有静止励磁调节器的双绕组感应发电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 145-150. Wangdong, Ma Weiming, Li Yumei, et al. Research on dual statorwinding induction generator with static excitation regulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 145-150(in Chinese).
- [4] Wang Dong, Ma Weiming, Xiao Fei, et al. A novel stand-alone dual stator-winding induction generator with static excitation regulation [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2005, 20(4): 826-835.
- [5] 张波涛, 马伟明, 肖飞, 等. 12/3 相双绕组感应发电机励磁系统的控制方法和动态特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 143-148. Zhang Botao, Ma Weiming, Xiao Fei, et al. Research on the control and dynamic performance of the exciting system in the 12/3 phase double-winding induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 143-148(in Chinese).
- [6] 张波涛, 马伟明, 肖飞, 等. 12/3 相DWIG励磁系统电容电压的模糊-PI双模控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 32-37. Zhang Botao, Ma Weiming, Xiao Fei, et al. Research on fuzzy-PI control of capacitor in the DC-link of the exciting system in 12/3 phase double-winding induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 32-37(in Chinese).
- [7] 刘陵顺, 胡育文, 黄文新. 变速运行的双绕组感应发电机电磁优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 125-130. Liu Lingshun, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Optimal design of dual stator-winding induction generator operating with variable speed [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 125-130(in Chinese).
- [8] 刘陵顺, 胡育文, 黄文新. 电力电子变换器控制的异步电机发电

- 技术[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 1-7.
- Liu Lingshun, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Summary of technology of induction generators with power electronic converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(5): 1-7(in Chinese).
- [9] 陈增禄, 毛惠丰, 周炳根, 等. SPWM数字化自然采样法的理论及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 32-37.
- Chen Zenglu, Mao Huifeng, Zhou Binggen, et al. A study on theory and application of digital natural sampling based SPWM [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 32-37(in Chinese).
- [10] 顾和荣, 杨子龙, 邹伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 100-112.
- Gu Herong, Yang Zilong, Wu Weiyang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 100-112(in Chinese).
- [11] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [12] 周扬忠, 胡育文, 黄文新. 低转矩磁链脉动型电励磁同步电机直接转矩驱动系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 152-157.
- Zhou Yangzhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Research on a direct torque control for electrically excited synchronous motor drive with low ripple in flux and torque[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 152-157(in Chinese).
- [13] 金舜, 钟彦儒, 程为彬. 新颖的SVPWM过调制策略及其在三电平逆变器中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 84-90.
- Jin Shun, Zhong Yanru, Cheng Weibin. Novel SVPWM over-modulation scheme and its application in three-level inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 84-90(in Chinese).
- [14] 李勇, 胡育文, 黄文新, 等. 变速运行的定子双绕组感应电机发电系统控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 124-130.
- Li Yong, Hu Yuwen, Huang Wenxin, et al. Research on the dual stator-winding induction generator with variable speed operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 124-130(in Chinese).
- [15] Eduard Muljadi, Thomas A. Lipo. Series compensated PWM inverter with battery supply applied to an isolated induction generator[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1994, 30(4): 1073-1083.



李勇

收稿日期: 2007-12-10。

作者简介:

李勇(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事可再生能源发电和功率电子学方面的研究工作, liyong@nuaa.edu.cn;

胡育文(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞机、车辆电源系统, 功率电子和可再生能源发电方面的研究;

黄文新(1966—), 男, 博士, 副教授, 主要从事功率电子学与电机控制方面的研究工作。

(责任编辑 王剑乔)