

文章编号:1000-582X(2004)01-0040-05

交流励磁发电机励磁控制系统的设计*

肖庆清,廖勇,姚骏,向大为

(重庆大学电气工程学院,重庆 400030)

摘要:从交流励磁发电机的基本原理出发,分析了基于动态同步坐标轴系的双通道励磁控制方法。利用基于高速数字信号处理器的双中央计算单元(CPU)方案,设计实现了交流励磁发电机的励磁控制系统。针对该控制系统的特点,充分利用了数字信号处理器(DSP)的高速运算能力和方便的外设,合理设计了控制系统硬件和励磁控制算法软件,双CPU工作共同实现了交流励磁发电机的双通道解耦励磁控制。通过实验分析,进一步验证了基于动态同步坐标轴系的双通道励磁控制策略。

关键词:交流励磁发电机;动态同步坐标轴系;数字信号处理器;励磁控制器

中图分类号:TM344.4

文献标识码:A

交流励磁发电机基本结构与绕线式异步电机相似,通过调节转子三相交流励磁电压的幅值、相位及频率,可以控制励磁磁场大小、相对转子位置和电机转速。由于增加了励磁控制的自由度,交流励磁发电机较传统同步发电机有更优越的运行性能。表现在:1)良好的稳定性及转速适应能力;2)独立的有功、无功调节能力;3)较强的进相运行能力^[1]。

要使交流励磁发电机能够发挥其良好的调节性能、运行的灵活性及可靠性,关键在于应有一套能充分发挥该电机运行特点的励磁控制系统^[2]。交流励磁发电机的励磁控制策略主要有基于异步电机矢量控制的励磁控制和双通道励磁控制两种^[3],基于动态同步轴系的双通道励磁控制系统,由于具有控制模型准确、无需励磁电流反馈、动态跟踪能力强,使其能在简化控制算法的基础上达到良好的控制效果^[4]。交流励磁发电机励磁控制为一多输入、多输出非线性控制系统,具有大量的、复杂的数字计算,同时发电机转子励磁由脉宽调制(PWM)逆变电源供电,在发电机机端电压、电流中含有较重的谐波,为了准确测量机端电压电流,必须采用运算量较大的数字滤波,进一步加大了对CPU运算速度和能力要求。为此笔者提出了采用基于DSP的双CPU控制系统,利用一块具有强大定点数运算能力的芯片TMS320VC5402实现控制算法,用一

块电机控制专用DSP芯片TMS320LF2407实现PWM的控制,采用双端口随机存储器(RAM)实现两DSP间数据交换,用高速数字信号处理器实现了交流励磁发电机励磁控制器的设计。通过试验进一步验证了笔者设计的励磁控制器满足交流励磁发电机运行控制要求,并具有控制精度高、响应速度快的特点。

1 动态同步轴系下的双通道解耦控制原理

对于单机无穷大系统,定子方按照发电机惯例,转子方按照电动机惯例,转差率 s 按照转速低于同步转速为正,电磁转矩与转向相反为正,可以得到交流励磁发电机在同步坐标轴系下的稳态电压电流方程式:

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ 0 \\ U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -X_\Sigma & 0 & X_M \\ X_\Sigma & -R_s & -X_M & 0 \\ 0 & -sX_M & R_r & sX_r \\ sX_M & 0 & -sX_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $X_\Sigma = X_s + X_w$; R_s, R_r 为定、转子电阻; X_M 为定、转子互抗; X_s, X_r 为定、转子全电抗; s 为转差率; X_w 是电网折算电抗。

利用电压电流方程,推导得到同步坐标轴系下的有功、无功计算方程:

$$P_1 = Y_{11} U_{sd} U_{sd} + Y_{13} U_{rd} U_{sd} + Y_{14} U_{rq} U_{sd} \quad (2)$$

* 收稿日期:2003-09-15

基金项目:国家“211”工程资助项目

作者简介:肖庆清(1978-),男,福建三明人,硕士,从事新型电机及其控制研究。

$$Q_1 = Y_{21}U_{sd}U_{sd} + Y_{23}U_{rd}U_{sd} + Y_{24}U_{rq}U_{sd} \quad (3)$$

式中： $Y_{11}, Y_{13}, Y_{14}, Y_{21}, Y_{23}, Y_{24}$ 是导纳矩阵中的对应项，只与电机参数和转差率有关，计算式为：

$$\left. \begin{aligned} Y_{11} &= (-R_s X_r^2 s^2 - X_M^2 R_r s - R_s R_r^2) / |Z| \\ Y_{13} &= (R_s X_M X_r s + X_\Sigma X_M R_r) / |Z| \\ Y_{14} &= [(-X_M X_\Sigma X_r + X_M^2) s + X_M R_s R_r] / |Z| \\ Y_{21} &= [(X_M^2 X_r - X_\Sigma X_r^2) s^2 - X_\Sigma R_r^2] / |Z| \\ Y_{23} &= [X_M X_\Sigma X_r - X_M^3] s - X_M R_s R_r / |Z| \\ Y_{24} &= (R_s X_M X_r s + X_\Sigma X_M R_r) / |Z| \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$|Z|$ 为阻抗矩阵 Z 的行列式值。可以看出，在同步坐标轴系下，有功、无功调节都与 U_{rd}, U_{rq} 有关，无法实现有功、无功的解耦控制。由式(4)可知： $Y_{13} = Y_{24}, Y_{23} = -Y_{14}$ 。

$$\begin{aligned} \text{令: } \sqrt{Y_{13}^2 + Y_{14}^2} &= \sqrt{Y_{24}^2 + (-Y_{23})^2} = Y; \\ \sqrt{U_{rd}^2 + U_{rq}^2} &= U_r \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{U_{rd}}{U_r} = \cos\alpha, \quad \frac{U_{rq}}{U_r} = \sin\alpha \quad (6)$$

$$\frac{Y_{13}}{Y} = \cos\delta, \quad \frac{-Y_{14}}{Y} = \sin\delta \quad (7)$$

可以得到动态同步坐标轴系下的有功、无功方程：

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= Y_{11}U_{sd}^2 + YU_{sd}U'_{rd} \\ Q_1 &= Y_{21}U_{sd}^2 + YU_{sd}U'_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $U'_{rd} = U_r \cos(\alpha + \delta), U'_{rq} = U_r \sin(\alpha + \delta)$ ，是转子励磁电压在动态同步坐标轴系下 d' 轴和 q' 轴的分量。可以看出，交流励磁发电机稳态运行时，有功调节仅与动态同步坐标轴系 d' 轴分量 U'_{rd} 有关，无功调节仅与动态同步坐标轴系 q' 轴分量 U'_{rq} 有关。因此控制励磁电压相量 U_r 在 d', q' 轴上的分量，就可实现对有功、无功的独立控制。

根据交流励磁发电机动态同步轴系下的解耦数学模型(8)，可以建立动态同步轴系下的交流励磁发电机励磁控制模型为：

$$\left. \begin{aligned} U'_{rd} &= U'_{rd0} + K_p \Delta P + K_s \Delta S \\ U'_{rq} &= U'_{rq0} + K_Q \Delta Q \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中：

$$\left. \begin{aligned} U'_{rd0} &= (P_1 - Y_{11}U_{sd}^2) / YU_{sd} \\ U'_{rq0} &= (Q_1 - Y_{21}U_{sd}^2) / YU_{sd} \end{aligned} \right\}$$

上式(9)为交流励磁发电机有功通道、无功通道的控制方程。其中 U'_{rd0}, U'_{rq0} 和 U'_{rd}, U'_{rq} 分别为励磁电压在动态同步轴系 d', q' 轴上的检测分量和给出控制分量， ΔP 误差调节用于跟踪原动机输出的有功功率变化，为当前检测到的有功输出与前一次检测到的有功输出之

差， Δs 为检测到的转差率与设定转差率之差， ΔQ 为设定无功输出与检测到的无功输出之差， K_p, K_Q, K_s 分别为反馈系数。依据反馈系数的选取原则可知，反馈系数的取值必须满足条件^[5]： $K_p > 0, K_Q > 0, K_s < 0$ 。

由控制方程式(9)可知，只要通过测量交流励磁发电机的机端电压、电流，计算出发电机的有功、无功，利用发电机参数就可计算出在动态同步轴系下的转子励磁电压 U'_{rd}, U'_{rq} ，再通过对转子位置的检测，进行坐标变换，从而给出转子励磁电压，而不需要对转子电压电流的测量，就可实现交流励磁发电机的励磁控制。

2 励磁控制系统硬件设计

控制系统使用 TI 公司的两款 DSP 芯片，采用双 CPU 实现方式。TMS320VC5402 作为主控 CPU，完成信号采集和励磁控制算法，是励磁控制系统的核心计算部分；TMS320LF2407 依据主计算 CPU 输出的励磁信号，产生 PWM 波形，控制励磁主回路的交直交变频器，输出三相励磁电压；双 CPU 间通过双端口存储器交换数据，共同实现了励磁控制系统的功能。控制系统的结构框图如图 1。

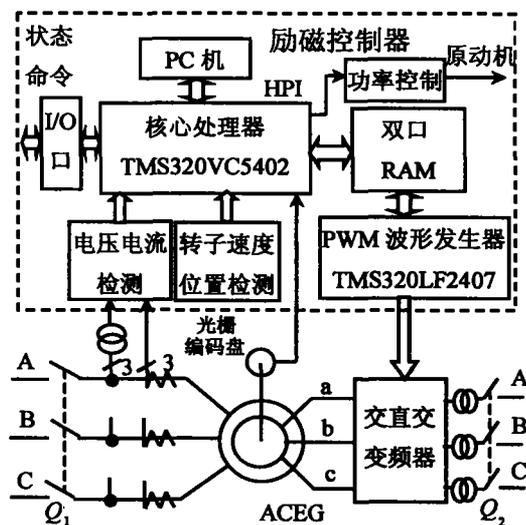


图 1 励磁控制系统硬件结构框图

3 励磁控制系统软件设计

由 TMS320VC5402 程序实现交流励磁发电机励磁控制算法。励磁控制器软件设计框图如图 2，软件设计主要包括信号检测部分和励磁控制算法实现部分。

3.1 信号检测模块设计

分别利用定子电压检测模块、定子电流检测模块、转差率检测模块和转子位置角检测模块实现发电机定子三相电压、电流瞬时值检测，转差率检测和转子位置角检测。

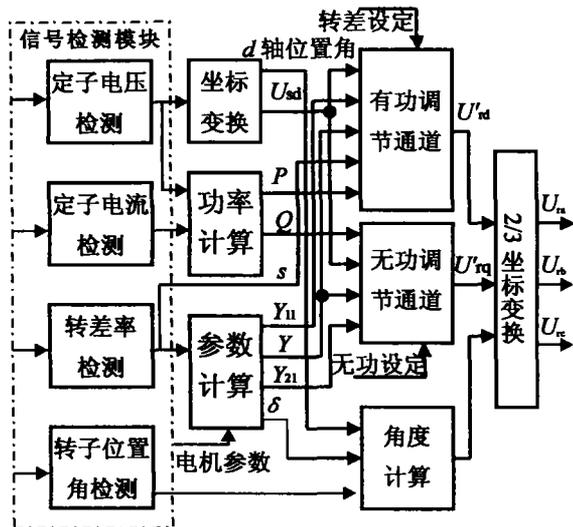


图2 励磁控制器软件设计框图

交流信号检测:对发电机定子三相电压和电流一周期内等间隔采样32点数据,用富氏算法分析得到电压、电流相量,实现交流信号的检测。通过测量定子电压周期,用软件倍频方法保证一周期内的等间隔采样。

采样通道间存在相位差,通道间相量方式的相位补偿方法为:

$$U' = U \times 1 \angle \Delta\phi \quad (10)$$

转差检测:通过计量定子电压整型得到的方波信号周期计算同步速度 \$n_0\$;利用圈脉冲、齿脉冲信号可以计算转子速度 \$n\$;则转差率可以求得。

转子位置角检测:通过检测齿脉冲个数得到转子位置角。转子位置角等于转子初始位置角与转子相对位置角之和,转子初始位置角是发出圈脉冲时刻转子 a 相绕组与定子 A 相绕组的电角度,由实验方法测得。

光栅编码盘一圈输出360个齿脉冲,电机为3对极发电机,一个齿脉冲对应电角度为3度,误差较大,应该考虑转子位置角测量的补偿。

3.2 励磁控制算法设计

励磁控制算法主要包括功率计算、参数计算、有功和无功通道调节和坐标变换几部分,如图2所示。

功率计算:可按下式计算求得:

$$P = (U_{Ar}I_{Ar} + U_{Ai}I_{Ai} + U_{Br}I_{Br} + U_{Bi}I_{Bi} + U_{Cr}I_{Cr} + U_{Ci}I_{Ci})/2$$

$$Q = (U_{Ai}I_{Ar} - U_{Ar}I_{Ai} + U_{Bi}I_{Br} - U_{Br}I_{Bi} + U_{Ci}I_{Cr} - U_{Cr}I_{Ci})/2 \quad (11)$$

3/2 坐标变换:发电机定子三相电压瞬时值坐标变换后,得到定子电压 \$d\$ 轴分量 \$U_{sd}\$ 和同步坐标系位置(\$d\$轴相对于定子 A 相绕组的电角度)。综合矢量法计算式为:

$$U_{sd} = (2/3) \times (U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c) \quad (12)$$

式中: \$\alpha = -(1/2) + j(\sqrt{3}/2)\$

电压相量是用余弦表示的相量,同步轴系 \$d\$ 轴固定在定子 A 相电压相量上,\$q\$ 轴超前 \$d\$ 轴,则计算得到的 \$U_{sd}\$ 相量的相角就是同步轴系 \$d\$ 轴的位置角,也就是同步轴系 \$d\$ 轴相对于定子 A 相绕组的电角度。

参数计算:利用式(4),由电机参数和转差率 \$s\$ 计算电机导纳矩阵中的值 \$Y_{11}\$、\$Y_{21}\$、\$Y\$ 和动态同步轴系与同步轴系间角度 \$\delta\$。

有功、无功调节器:有功调节通道和无功调节通道分别实现式(9)的两个控制方程。对于有功调节通道,引入有功功率 \$P\$ 和转差率 \$s\$ 的误差量 \$\Delta P\$ 和 \$\Delta s\$ 作为两个调节器的调节量。与当前的检测励磁电压分量相加,作为新一个状态转子励磁电压相量在动态同步坐标系 \$d'\$ 轴的分量。对于无功调节通道,其调节过程几乎是一个纯粹的电磁过程,不涉及过渡过程,忽略 \$s\$ 的变化对无功输出的影响,只引入无功误差量作为调节器的调节量^[8]。

2/3 坐标变换:由转子位置角 \$\theta_2\$、动态同步轴系与同步轴系的夹角 \$\delta\$、同步轴系 \$d\$ 轴位置角 \$\theta_1\$ 可以计算转子 a 相绕组相对动态同步轴系 \$d'\$ 轴的电角度 \$\theta\$。关系如图3。

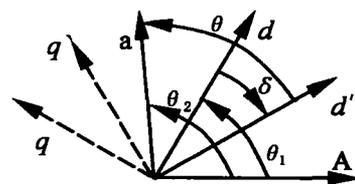


图3 计算 a 相绕组相对 \$d'\$ 轴的电角度

坐标变换依据该角度,把励磁电压在动态同步轴系下的励磁电压分量 \$U'_{rd}\$、\$U'_{rq}\$ 变换为转子实际三相绕组的励磁电压分量 \$U_a\$、\$U_b\$、\$U_c\$,实现励磁控制算法^[9]。

3.3 数字滤波设计

实际系统中,由于转子励磁电压含有谐波,导致定子电压和电流富含谐波,使得检测的有功、无功谐波成分较大,如图4所示(图4—图7的纵坐标是标么值表示的值)。

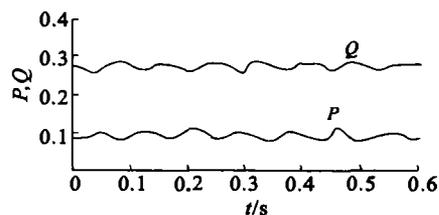


图4 没有滤波的有功、无功波形

从图4可以看出功率波形含有低频谐波分量,且随励磁电压频率的改变而变化,不能够利用固定长度的滤波方法。笔者采用变长度滤波方法,依据励磁电压频率确定滤波长度,使用多次测量求平均值滤波方法。采用动态滤波后的 P 、 Q 波形如图5。

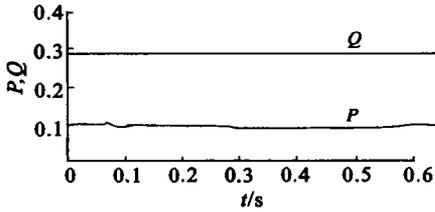


图5 数字滤波后的有功、无功波形

定子电压中具有负序分量,由综合矢量法计算的 U_{sd} 会产生二次谐波,如图6滤波前的 U_{sd} 波形所示。

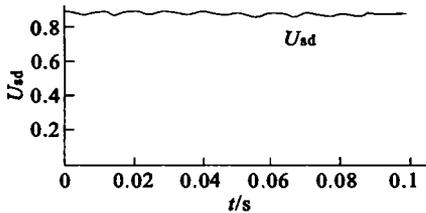


图6 没有滤波的 U_{sd} 波形

滤除该二次谐波只要取一个基波周期内的计算数据求平均值即可,保证系统响应实时性的同时有比较好的滤波效果,如图7。

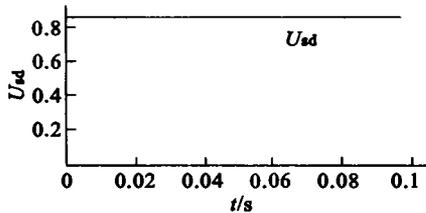


图7 数字滤波后的 U_{sd} 波形

实际系统中即使用圈脉冲来计算转差率,测量值波动仍然比较大,如图8。

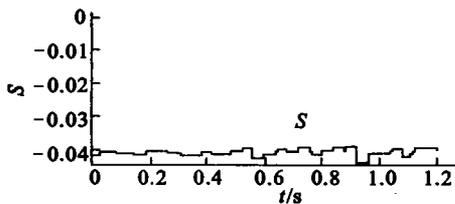


图8 没有滤波的转差率波形

同样使用数字滤波器对转差进行处理,增加转差变化的平滑性。滤波后的转差率波形如图9。

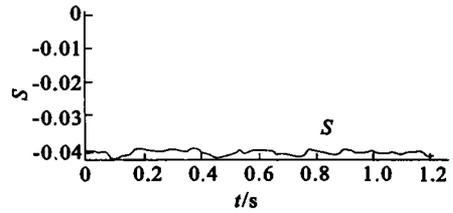


图9 数字滤波后的转差率波形

4 实验结果与分析

笔者利用国家“211”异步化模拟发电机实验室的交流励磁发电机机组,采用以上励磁控制系统进行了实验,其中图10、11为交流励磁发电机并网前后的转子励磁电流,从图中可知,励磁电流中含有谐波,并网前励磁电流中的谐波由励磁电压的谐波产生,由于采用PWM逆变器,谐波分量较小,但并网后定转子谐波电流的相互作用,使得转子谐波电流有所增大。图12、13分别为有功、无功调节时,发电机机端有功、无功的变化曲线,由实验曲线可知,该励磁控制能实现有功、无功及速度的独立调节,满足交流励磁发电机的控制要求。

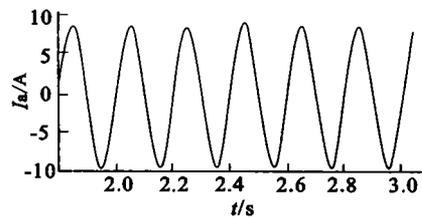


图10 并网前励磁电流曲线

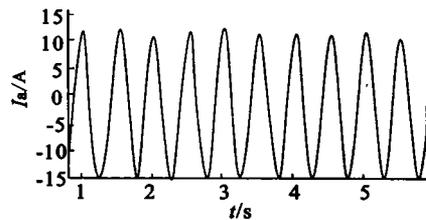


图11 并网后励磁电流曲线

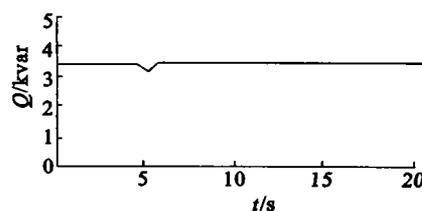
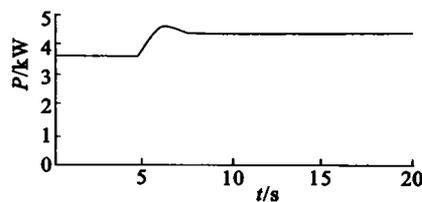


图12 原动机输出增大时发电机有功、无功曲线

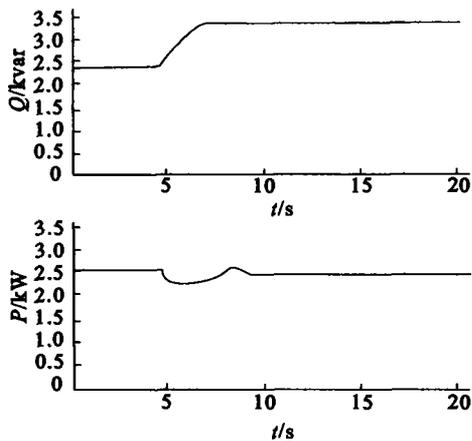


图 13 无功调节时的发电机无功、有功曲线

5 结 论

文中研究的基于 DSP 的双 CPU 交流励磁发电机励磁控制系统,实现了交流励磁发电机在动态同步坐标轴系下双通道解耦励磁控制;满足交流励磁发电机的励磁控制要求;进一步验证了基于双通道励磁控制策略的正确性;由于励磁电压中含有谐波,会在发电机定子电压、电流和电磁功率中产生高次谐波。为准确实现励磁控制,必须采用数字滤波;本设计充分利用了 TMS320VC5402 和 TMS320LF2407 的特点,所完成的交流励磁发电机励磁控制器具有结构简单、控制速度快等特点,为进一步加速交流励磁发电机的工程应用奠定了基础。

参考文献:

[1] 徐锦才,许大中.多相励磁发电技术的研究概述[J].电

力系统自动化,1997,21(4):44-46.

- [2] BOGALECKA E, ACADEMY M. Control System of A Doubly - Fed Induction Machine Working as A Generator[J]. Intelligent Motion, 1991, (6): 104 - 112.
- [3] 赵荣祥, 陈辉明, 尹强, 等. 水轮发电机交流励磁变速运行控制系统的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 1999, 33(6): 576 - 601.
- [4] 杨顺昌, 廖勇, 漆小龙. 动态同步轴及其应用[J]. 电工技术学报, 1999, 14(4): 42 - 46.
- [5] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机双通道励磁系统反馈参数的选取原则[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 52 - 55.
- [6] 戴明桢, 周建江. TMS320C54x DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [7] 张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 第 2 版. 成都: 电子工业出版社, 2000.
- [8] YAMAOTO M. Active and Reactive Power Control for Doubly - Fed Wound Rotor Induction Generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(4): 624 - 629.
- [9] 杨顺昌. 电机的矩阵分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1988.

附 录

交流励磁发电机参数为:

额定功率: 7.5 kW;

额定线电压: 380 V; 极数: 6;

定子电阻、漏抗: 0.828 5 Ω , 1.124 4 Ω ;

转子电阻、漏抗: 0.702 7 Ω , 1.124 4 Ω ;

定、转子互抗: 19.679 Ω ;

转动惯量: 0.15 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

Design of Excitation Control System of A. C. Excited Generator

XIAO Qing-qing, LIAO Yong, YAO Jun, XIANG Da-wei

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Dual-passage excitation control method based on dynamical synchronous reference frame is analysed according to the base theory of A. C. excited generator. Using the dual-CPU project basing on the high speed DSP, excitation control system of A. C. excited generator is realized. Considering the characteristic of this control system, taking full advantage of the high speed and the convenient peripherals of DSP, the hardware and software of the control system are designed appropriately. Dual-passage excitation control system is realized using the dual-CPU method. Dual - passage excitation control strategy based on dynamic synchronous reference frame is proved with the experiment.

Key words: alternating current excited generator; dynamic synchronous reference frame; DSP; excitation control system

(编辑 李胜春)