

[矢量控制]

一种新型交流感应无刷励磁矢量控制系统

文/胡亚光 钟庭剑 万新儒 吴芳红
国网江西省电力有限公司培训中心

基于矢量控制的新型交流感应式无刷励磁系统是针对现有无刷励磁装置难以起励，低速以及难以输出较大的励磁功率而提出的。无刷励磁系统的数学模型是在励磁机矢量控制的基础上进行详细分析的，然后在任意转速下调节励磁机的电压和相对于转子转速的旋转磁场，从而输出主电机所需的功率。同时对主机的励磁电流进行实时检测，并利用励磁机的定子电压和电流进行控制。模拟和实验结果表明，主机所需的励磁功率可以通过矢量控制的无刷励磁系统快速准确地输出。

同步电机在工业和农业生产中应用广泛，起着重要的作用，无刷励磁同步电机是一种集电力电子和自动控制技术为一体，在工业生产中广泛应用的电机，是随着电力电子技术的发展而迅速产生的。

旋转式整流器目前广泛采用三级式无刷励磁系统实现无刷化。系统是由永磁副励磁机或外接电源励磁机主电机等组成的，其中励磁机通过旋转整流器将交流电输出后，由励磁机供给主电机的励磁绕组，利用永磁副励磁机或外接电源为励磁机的励磁绕组供电的旋转电枢式发电机。主电机的励磁电流通过调节励磁机的励磁进行调节。这套无刷励磁系统虽然起励性不错，但在低转速区间无法提供足够的励磁动力的同时，增加了电机的整体长度和复杂度，降低了功率密度。

有文献提出通过旋转整流器，利用谐波绕组感应的电压为励磁绕组供电，从而实现单枢无刷同步电机结构，对励磁绕组进行二次谐波和齿谐波无刷化励磁。而电机目前还不能很好地满足大批量生产的需要，因为电磁兼容性弱，转子结构复杂。

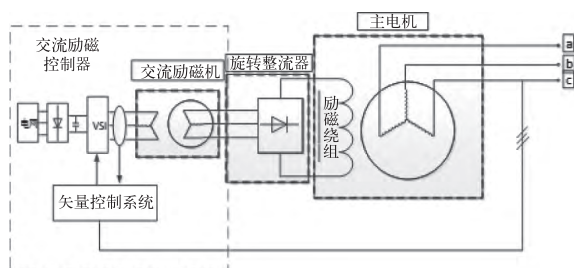
与电励磁相比，永磁电机具有结构简单、功率密度大，且实现无刷化的优点^[10]。而永磁电机的气

隙磁场则难以调节，因而在更多领域的应用受到限制。有文献研究感应式无刷励磁系统，采用三相晶闸管交流调压。这套系统的交流励磁机定子转动磁场的转向与转子转速相反，足够的励磁动力可以在低转速时输出。交流励磁机的定子为交流和直流两套绕组，在电机进入正常转速后起动并使用直流励磁，从而达到在高速状态下降低谐波含量的目的。有学者研究单相交流励磁机，以减少励磁机定子绕组的复杂性。该方案在定子侧只有一套单相绕组，单相绕组开机时通入交流电，开机后切换为直流供电，在具备开机和发电双重作用的同时，降低了励磁机的复杂度。但励磁机的定子旋转磁场转速不能通过晶闸管交流调压进行调节，动态性能不理想，励磁电流也不能被检测出来，所以励磁电流的闭环控制很难满足变频调速矢量控制的要求。

本文在此基础上提出交流变频感应无刷励磁矢量控制新系统。系统由旋转整流器和变频式磁力仪组成交流感应式磁力机。主电机所需的电力可以在任何转速下输出，控制交流感应式磁力机转动磁场的大小和转速。首先详细推导无刷励磁矢量控制原理，然后对交流励磁机进行矢量控制的仿真与试验

新型交流感应本文提出的无刷励磁系统结构

该系统由交流励磁机、旋转式整流器、变频励磁磁控制器以及一个主电机组成。交流励磁机、旋转式整流器和主电机同轴安装。交流励磁机的转子绕组在主电机转动时输出三相交流电,经固定在转轴的三相不控全桥转动整流器上流成直流电,直接供给主电机励磁绕组,在结构上与绕线式异步电动机类似。



交流感应式励磁机在任何转速下（包括零速）都能输出足够的励磁功率，而不受电机转速的限制。交流感应式励磁机的功率密度和材料利用率都能因旋转磁场转速的增加而得到显著的改善，从而使体积急剧缩小。由于交流励磁机转子绕组的输出电压与旋转磁场相对于转子的转速成正比，因此，无刷励磁系统的动态性能可以通过磁链观测器来控制旋转磁场。该方案无需永磁副励磁机和外部电源，且彻底解决无刷励磁系统低速输出功率不足及功率密度低的问题。

无刷励磁系统的矢量控制策略

1. 无刷励磁系统的矢量控制原理

在结构上,交流感应式励磁机与绕线异步电机类似,因此数学模型也与其类似。为研究和控制方便,一般采用基于转子磁场定向下的数学模型作为研究对象。

在转子磁链的定向作用下,其关系式为

$$\begin{cases} \psi_{\text{rd}} = \psi_{\text{r}} \\ \psi_{\text{rq}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

因此, 交流感应励磁机的电压方程可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{sd}} = R_{\text{s}} i_{\text{sd}} + \frac{d\psi_{\text{sd}}}{dt} - \omega_{\text{s}} \psi_{\text{sq}} \\ u_{\text{sq}} = R_{\text{s}} i_{\text{sq}} + \frac{d\psi_{\text{sq}}}{dt} + \omega_{\text{s}} \psi_{\text{sd}} \\ u_{\text{rd}} = R_{\text{r}} i_{\text{rd}} + \frac{d\psi_{\text{rd}}}{dt} \\ u_{\text{rq}} = R_{\text{r}} i_{\text{rq}} + \omega_{\text{sl}} \psi_{\text{rd}} \end{array} \right. \quad (2)$$

交流感应励磁机的 q 轴电流, 根据磁链方程, 总是符合以下关系

$$i_{\text{rq}} = -i_{\text{sq}} L_{\text{m}} / L_{\text{r}} \quad (3)$$

与笼型异步电机不同的是,在交流感应式励磁机中,它的转子绕组与整流桥负载相连,转子绕组中的电压 u_{rd} 、 u_{rq} 不为0。虽然整流桥负载为非线性负载,且具有复杂的输出特性,但仍能以等效非线性电阻 r_c 来取代整流桥负载。转子电压计算公式为

$$u_{\text{rq}} = -r_{\text{f}} \dot{i}_{\text{rq}} \quad (4)$$

$$u_{\text{rd}} = -r_{\text{f}} i_{\text{rd}} \quad (5)$$

利用上述方程可以消除励磁机电压方程中的转子电压,使励磁机除了转子电阻是特性复杂的非线性电阻外,其大小会随着整流桥负载运转状况而改变外,其数学模型与一般的异步电机相同。因此,与异步电机调速相比,利用定子电流和转子转速($i-n$ 法)来实现磁链检测的难度要大得多。

式(1)、式(4)和式(5)代入转子电压方程式(2)即可得

$$\psi_{\text{rd}} = \frac{L_{\text{m}}}{1 + \tau_{\text{r}} p} i_{\text{sd}} \quad (6)$$

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{\psi_{rd}} i_{sq} \quad (7)$$

式中, $\tau_r' = L_r' / R_r'$ 为转子回路的时间常数; $R_r' = r_r + R_r$ 为转子回路总电阻; $R_r'' = (L_m / L_r) R_r'$ 为折算到定子侧的转子电阻。

同理，定子电压方程经过推导可以得到

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s p i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + (L_m / L_r) p \psi_{rd} \quad (8)$$

$$u_{sq} = (R_s + R_r'')i_{sq} + \sigma L_s p i_{sq} + \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_r \psi_{rd} \quad (9)$$

交流感应式励磁机的电磁力矩为

$$T_e = n_p (L_m / L_r) \psi_{rd} i_{sq} = n_p \omega_{sl} \psi_{rd}^2 / R_r \quad (10)$$

式(6)~式(10)在交流励磁机的转子磁场方向下,构成矢量控制方程。由式(3)可知,定子的 q 轴电流可以直接控制交流感应励磁机转子的 q 轴电流。但不同于异步电机矢量控制的是:它不是

在转矩控制上使用的，而是用于转子输出的励磁控制，以控制转子的输出。由式（6）可知，通过定子 d 轴电流可以直接对转子磁链进行控制的是交流感应励磁机。转子时间常数 τ_r 是一个变化的数值，但比异步电机转子的时间常数 τ_r 要小得多，这是由于转子等效非线性电阻 R_r' 的影响。所以相对于异步电机调速的磁链控制，交流感应励磁机磁链控制的快捷性更好。由式（9）可知，定子的 q 轴电压可以控制交流感应励磁机定子的 q 轴电流。但其 q 轴电流直接受制于旋转式整流器的运行状态，这是由于转子等效非线性电阻 R_r' 的影响。需要注意的是，用电流和转速（ i - n 法）检测转子磁链，很难受到转子等效非线性电阻的影响而实现。

2. 主机励磁电流检测与控制原理

现有的无刷励磁系统的励磁电流一般只能通过感应器来检测，而交流励磁机的定子电压和电流是不能被探测到的。因此，目前的无刷励磁系统交流变频感应式励磁机定和转子耦合紧密，使主机检测励磁电流时不需要传感器，从而提供了良好的条件。只要观察交流感应励磁机的磁链，求得转子电流很容易，即

$$\begin{cases} i_{ra} = \frac{1}{L_m}(\psi_{sa} - L_s i_{sa}) \\ i_{rb} = \frac{1}{L_m}(\psi_{sb} - L_s i_{sb}) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_{ra} = \frac{1}{L_r}(\psi_{ra} - L_m i_{sa}) \\ i_{rb} = \frac{1}{L_r}(\psi_{rb} - L_m i_{sb}) \end{cases} \quad (12)$$

交流感应式励磁机的转子电流经旋转整流器转换为直流电后由主机励磁电流提供的电流，因此主机励磁电流与转子相电流的幅值相等，即

$$\hat{i}_t = \sqrt{2(i_{ra}^2 + i_{rb}^2)}/3 \quad (13)$$

整流电路是非线性负载，使转子电流的幅值发生脉动，在交流侧包含大量谐波的三相电流。所以在实际使用的时候，滤镜是很有必要的。

从转子磁场定向的控制策略可以知道，是 d 轴电流产生磁场，磁场储能可以在励磁机内部发生变化；电磁力矩的产生是由于 q 轴电流改变了励磁机输出的电磁功率。此外，一般情况下，内部的磁场储能主要是由定子 d 轴电流产生的磁场储能，这

种电流来自极小的转子 d 轴电流。因此，除了能更精确地反映整流器输出电流的大小外，转子的 q 轴电流还可以矢量控制主机的励磁电流。由式（3）可知定子的 q 轴电流可以直接控制交流感应励磁机转子的 q 轴电流。因此，主机励磁电流可以通过一个PI控制器控制定子的 q 轴电流，然后采用矢量控制的方法去控制交流励磁机，进而控制主电机的性能。

无刷励磁矢量控制系统的仿真分析

为验证无刷励磁矢量控制系统的合理性和可行性，根据无刷励磁矢量控制方案，在MATLAB/Simulink中构建相应的仿真模型。在模拟实验中，主电机励磁绕组模拟用一个电阻和电感来实现，交流励磁机和选用的主机励磁绕组参数见表1。

表1 交流励磁机参数

参数	值	参数	值
额定功率 P_N/kW	10	定子漏抗 X_{σ}/Ω	1.2
额定电压 U_{1N}/V	380	激磁电阻 R_m/Ω	3.72
定子电阻 R_s/Ω	0.488	激磁电抗 X_m/Ω	39.5
转子电阻 R_r/Ω	0.408	励磁绕组电阻 R_f/Ω	2
转子漏抗 $X_{\sigma r}/\Omega$	1.333	励磁绕组电感 L_f/H	0.01

为验证励磁系统矢量控制在低转速下的动态性能，在模拟过程中设定 $n=10$ r/min，在 $t=1.5$ s时，时励磁电流的给定值由80 A变为60 A，得到如图2~图4所示的模拟结果。

由图2可知，励磁电流 i_t 的实际值能在励磁电流给出定值80 A的情况下，迅速、准确地跟随给定值。当励磁给定电流在 $t=1.5$ s时由80 A变为60 A时，实际中的励磁电流在响应时间 $t=0.002$ s，稳态准确度误差在2.5%以内的情况下，几乎可以不发生超调跟随给定值的变化，这说明系统具有更好的动态性能和更高的准确度。从图2~图4可知，通过降低定子电压的幅值和定子电压频率，可以明显看出主机励磁电流的降低。然而，定子电压幅值的降低是因为定子频率的降低，使控制系统中的 q 轴电压分量降低，而使电压调制比在SVPWM中降低。模拟结果符合前述理论计算，是对前述理论推导的正确性的论证，也是对这种方法可行性和合理性的一种验证。

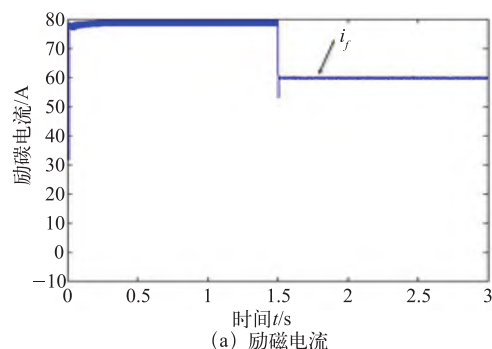
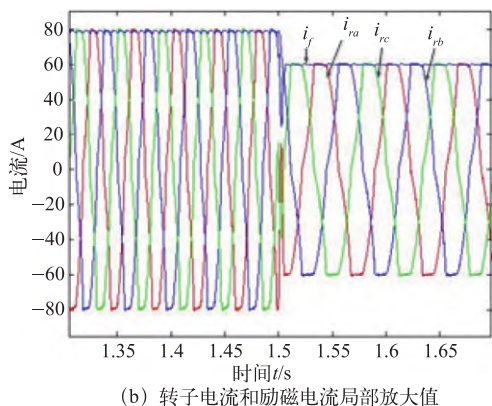


图2 励磁电流给定值从80 A到60 A的波形图

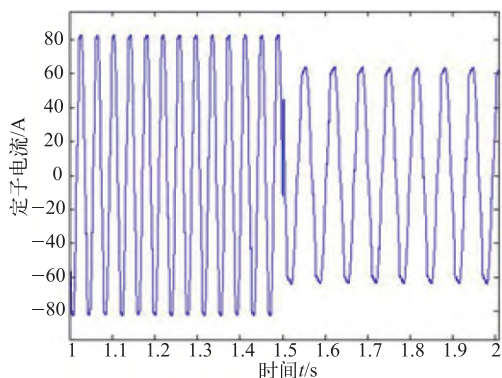


图3 定子电流

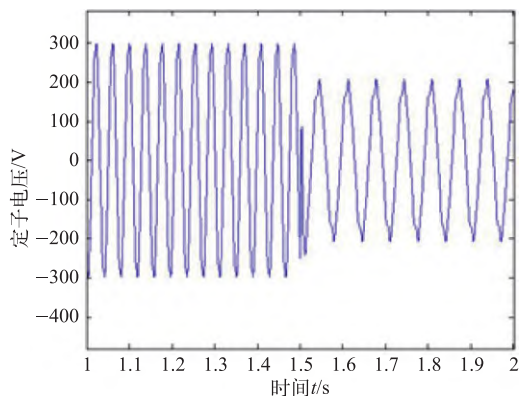


图4 定子电压

无刷励磁矢量控制系统的实验验证

为验证理论分析和仿真结果的正确性，交流励磁机进行了矢量控制实验。实验平台主要由3台电机组成：笼式变频调速电机、交流感应励磁机和同步发电机，如图5所示。同步发电机的功率为120 kW，内部搭建一座以碳刷引出的旋转整流器，以便于同步发电机励磁绕组励磁电流的测量。转子三相绕组绕线式异步电动机通过引线连接到旋转整流器。变频调速电机使用笼式异步电机，功率为11 kW，以变频调速电机为原动力，在任何转速下都能以模拟实际情况的方式运行。与交流励磁机同轴安装的变频调速电动机随转轴转动。

实验台内设置两个控制器：一个转速控制器，控制笼式异步电机的转速；另一个是励磁控制器，用于励磁电流控制。励磁控制器主要由检测板和检测板两部分组成。该检测板主要在励磁机上实现定子电压和电流量的调节，并将其对应的引脚送到DSP上。

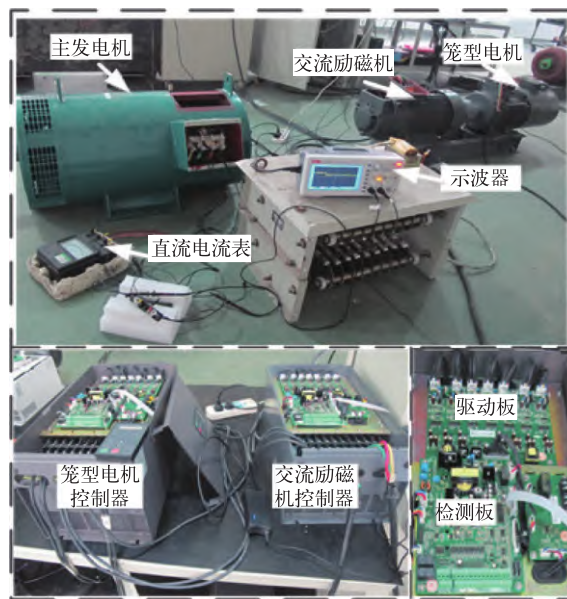


图5 交流励磁系统实验平台

1. 励磁系统的电流特性

电机转速为600 r/min，对交流励磁系统励磁电流进行开环实验，对励磁机进行励磁性能验证。实验中，主机励磁电流 i_f 是通过旋转整流器进行整流后，通过改变定子 q 轴电流的给定值，从而得到励磁机实测电流特性，励磁电流 i_f 在转子磁场定向中得到，如图6所示。

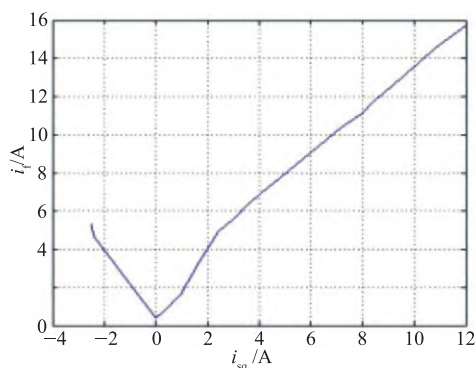


图6 定子q轴电流和励磁电流的关系曲线

从图6可以看出, 定子q轴电流 i_{sq} 与 i_f 之间近似为一种线性关系, 即定子q轴电流越大, 转子输出的功率电流也就越大。当定子q轴电流为0时, 励磁电流的值为0.4 A, 接近于0。实验结果与前面的理论推导相吻合, 为交流励磁系统励磁电流控制的进一步研究提供理论依据。

2. 励磁机矢量控制实验分析

该实验是交流励磁机基于向量控制转子磁场定向进行的, 实验时转速保持在600 r/min。如电机转子磁链、定子电流、转子电流、定子电压、定子电流q轴分量 i_{sq} 、励磁电流 i_f 等励磁机矢量控制过程中的变量, 均由DSP输出引脚用示波器查看。图7为定子电压, 是当励磁电流定为25 A时, 实际数值为纵轴标尺1 V为30 V。图8为定子电流的两个分量, 纵轴标尺1 V表示实际电流为5 A。

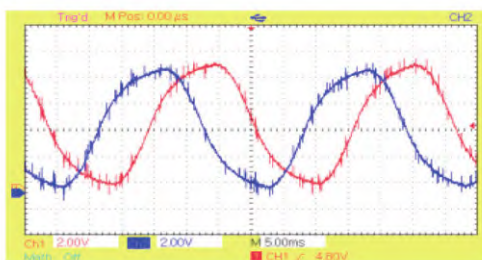


图7 定子电压 u_{α}, u_{β}

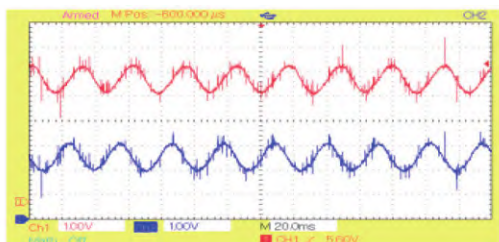


图8 定子电流 i_{α}, i_{β}

图7用直流母线电压重建定子电压 $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 。图8定子电流 $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 是由Clark变换收集到的电流信号得到的。由图7、图8可知, 定子电压和电流信号中含有大量的谐波。图9和图10分别为转子磁链分量和转子磁链幅值。图中纵轴标尺1 V表示实际磁链为0.1 Wb。

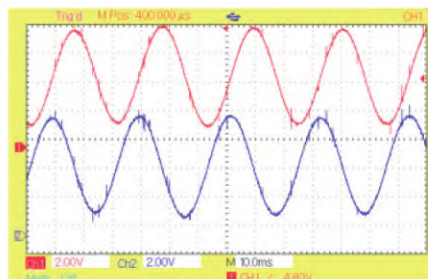


图9 转子磁链 $\psi_{\alpha}, \psi_{\beta}$

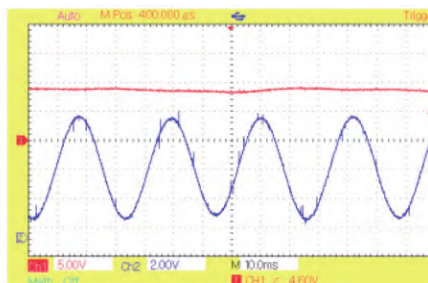


图10 转子磁链 $\psi_{\alpha}, \psi_{\beta}, \psi_r$

从图9, 图10可以看出, 通过定子d轴电流在转子磁场定向下可以很好地控制转子磁链, 通过电压模型检测到的转子磁链基本保持稳定。

图11为纵轴标尺为5 A/V的转子电流的两个分量。显示转子电流的正弦度较差, 谐波较多, 这主要是由于整流桥负载的非线性造成的。正弦度如果经过滤波就会提高。同样, 图12中的转子电流也因为整流桥负载的非线性而出现一定的波动。

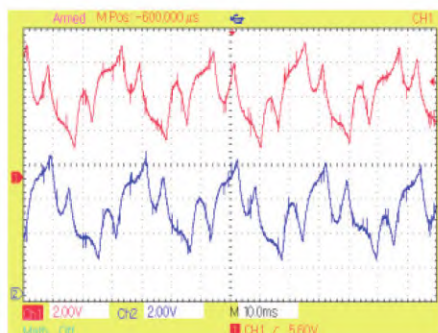


图11 转子电流 i_{α}, i_{β}

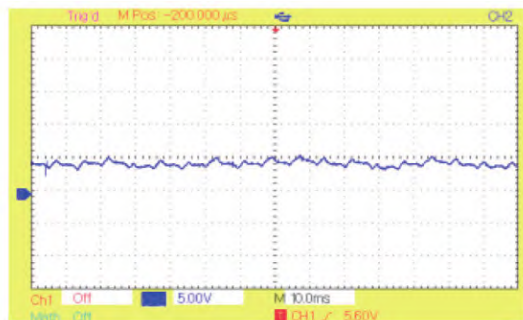


图12 检测的励磁电流 i_f

图12中，纵轴标尺为5 A/V。由图12可知，当给定励磁电流 i_f 为25 A时，检测的励磁电流基本保持稳定，误差在5%以内波动。由于磁链角的探测会出现一定的偏差，同时也受到整流桥非线性负载的影响，成为检测的电流波动产生的主要原因。

i_f 的变化曲线如图13所示，当给定励磁电流由10 A增加到20 A时。 i_f 的变化曲线如图14所示，当给定励磁电流由20 A降至10 A时。图14中纵轴标尺显示为5 A/V。

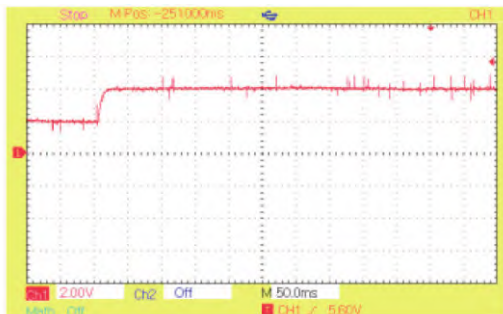


图13 实际检测的 i_f 值

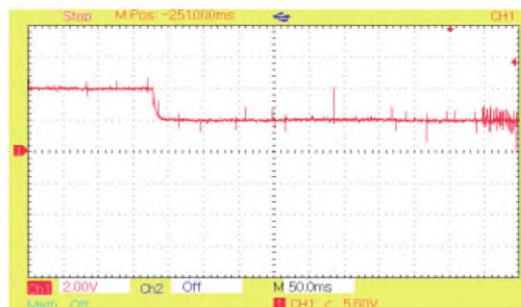


图14 实际检测的 i_f 值

从图13，图14可以看出，当励磁电流从10 A升至20 A时，系统动态调整时间约为17 ms，当励磁电流从20 A降至10 A时，系统动态调整时间约为14 ms，均小于一个电周期。这表明交流励磁系统具有很强的励磁动态性能。

结束语

本文提出新型的基于矢量控制的交流感应无刷励磁系统方法，详细分析采用矢量控制实现励磁系统励磁功率的输出和调节，解决励磁系统起励困难和励磁功率输出受限的问题。无刷励磁系统矢量控制的可行性和正确性已通过理论计算、仿真分析和样机验证。同时，交流励磁系统具有很强的励磁动态性能。这种励磁方法在航空启动/发电、船舶上具有良好的应用前景。EA

(收稿日期：2024-09-27)

