

双馈风力发电机的稳态分析

郁 灿, 金新民, 张 禄, 战亮宇

(北京交通大学 新能源研究所, 北京 100044)

摘 要: 在给出双馈风力发电机工作状况和等效电路的基础上, 介绍了双馈风力发电机的稳态分析, 对其定子和转子侧电流的计算过程进行了推算; 随后, 在已知电机额定参数的条件下, 计算出满功率时定子和转子侧的能量和电流, 对双馈风力发电机的稳态分析进行了仿真; 最后, 用双馈风力发电机组满功率发电实验时的电流波形验证了理论分析的正确性。

关键词: 双馈风力发电机; 定子; 转子; 电流; 稳态分析

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)04-0019-05

Steady-state Analysis of Doubly-fed Wind Power Generator

YU Can, JIN Xin-min, ZHANG Lu, ZHAN Liang-yu

(New and Renewable Energy Research Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: It introduces the steady-state analysis of doubly-fed wind power generator based on the work conditions and the equivalent circuit, reckons the calculation process of the current on both stator side and rotor side. Then, under the known rated parameters of the generator, energy and current on the stator side and rotor side are calculated with full power. The steady-state analysis of the generator is also simulated. At last, it is verified the correctness of the theoretical analysis based on the experimental current waveforms under the full power generation of doubly-fed wind power generator.

Key words: doubly-fed wind power generator; stator; rotor; current; steady-state analysis

0 引言

随着传统能源危机的提前到来, 以及人们环保意识的加强, 新能源发电技术尤其是风力发电技术越来越受到人们重视。目前常用的风力发电技术有永磁直驱和双馈异步两种类型, 双馈异步风力发电机由于其体积小、重量轻、所需变频器容量小、供电质量高等特点, 成为大型风力发电机的主要机型。

双馈风力发电机可以运行在次同步电动、次同步发电、超同步电动和超同步发电 4 种工况下, 不同的运行工况下发电机的电压、电流、转速、功率等参数都会

发生变化, 这些变化要求设计变流器时需综合考虑电压等级和电流大小的影响。因此, 双馈风力发电机的稳态分析具有十分重要的意义。

1 双馈发电机工作状况分析

双馈风力发电机在结构上与绕线异步电机类似, 其定子和转子侧都可以向电网馈送能量: 定子绕组直接接入电网, 转子绕组通过背靠背的变流器接入电网。双馈风力发电机运行在稳态时, 其定子旋转磁场与转子磁场在空间上保持相对静止。双馈电机的同步转速为 n_s , 电机实际转速为 n , 极对数为 p , 转差率为 s , 定子电流频率 f_1 不变, 转子的旋转频率随转速变化而变化,

且转子电流频率 $f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} = \frac{n_s - n}{n_s} \times \frac{pn_s}{60} = sf_1$ 。当风速

收稿日期: 2010-04-20

作者简介: 郁 灿 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事风力发电变流器的研究。

的改变引起双馈电机转速变化时,转子侧变流器可以通过调节电流和电压的频率,保证定子输出频率不变,即双馈风力发电机实现变速恒频运行。

双馈风力发电机组由叶片捕获风能,吸收的风能经齿轮箱送至发电机。常规双馈异步电机可工作在4种状态下,即次同步电动、次同步发电、超同步电动和超同步发电,但双馈风力发电机组工作时处于发电状态,因此,双馈风力发电机在次同步发电和超同步发电时能量的流向如图1和图2所示^[1]。

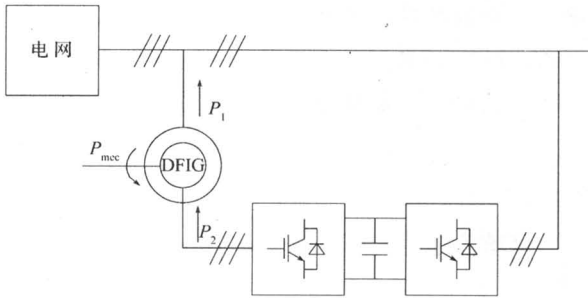


图1 次同步发电

Fig. 1 Subsynchronous generating mode

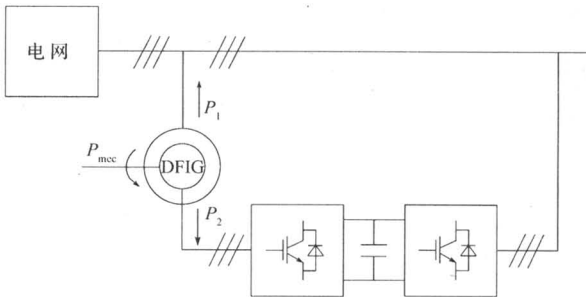


图2 超同步发电

Fig. 2 Hypersynchronous generating mode

图1为次同步发电工作状况时的有功功率流向图,电机实际转速 $n < n_s$,转差率 $s > 0$,双馈电机从转轴吸收机械功率 P_{mec} ,通过定子向电网输出功率 P_1 ,转子通过变流器从电网吸收功率 P_2 。

图2为超同步发电工作状况时的有功功率流向图,电机实际转速 $n > n_s$,转差率 $s < 0$,双馈电机从转轴吸收机械功率 P_{mec} ,通过定子向电网输出功率 P_1 ,转子侧通过背靠背变流器向电网输出功率 P_2 。

2 双馈电机等效电路及稳态分析

在电机结构中双馈风力发电机的定子和转子侧的电磁关系及其功率流向较复杂,对此进行分析需要先根据异步电机的等效电路原理,对转子绕组进行归算,并按照归算前后定子的所有物理量以及定子传送到转子的功率保持不变的原理给出双馈电机的等效电路(图3)^[2]。

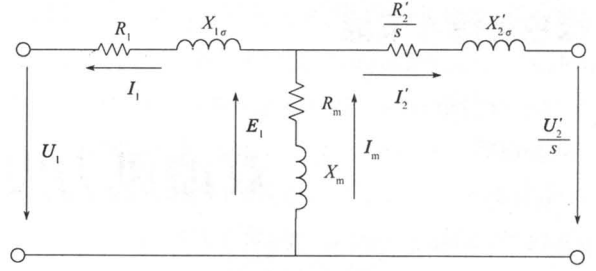


图3 双馈电机等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of doubly-fed generator

由基尔霍夫电压定律和电流定律可列出如下方程:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= -I_m(R_m + jX_m) \\ U_1 &= E_1 - I_1(R_1 + jX_{1\sigma}) \\ \frac{U_2'}{s} &= E_1 - I_2'(\frac{R_2'}{s} + jX_{2\sigma}') \\ I_m &= I_1 + I_2' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: R_1 ——定子侧电阻; $X_{1\sigma}$ ——定子侧漏抗; R_2' ——转子归算到定子侧的电阻; $X_{2\sigma}'$ ——转子归算到定子侧的漏抗; R_m ——与定子铁心损耗相对应的等效电阻; X_m ——与主磁通相对应的铁心电路的励磁电抗; I_1 ——定子侧电流; I_2' ——转子侧归算到定子侧电流; I_m ——激磁电流; U_1 ——定子侧电压; U_2' ——转子侧归算到定子侧电压。

由电路中有功功率和无功功率的定义($P = UI \cos \varphi$ 和 $Q = UI \sin \varphi$)可得^[3]:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= m_1 U_1 I_1 \cos \varphi = 3 U_1 I_1 \cos \varphi \\ Q_1 &= m_1 U_1 I_1 \sin \varphi = 3 U_1 I_1 \sin \varphi \\ P_{cu1} &= m_1 I_1^2 R_1 = 3 I_1^2 R_1 \\ Q_{x1} &= m_1 I_1^2 X_{1\sigma} = 3 I_1^2 X_{1\sigma} \\ P_{cu2} &= m_1 I_2'^2 R_2' = 3 I_2'^2 R_2' \\ Q_{x2} &= m_1 s I_2'^2 X_{2\sigma}' = 3 s I_2'^2 X_{2\sigma}' \\ P_m &= m_1 I_m^2 R_m = 3 I_m^2 R_m \\ Q_m &= m_1 I_m^2 X_m = 3 I_m^2 X_m \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: P_1 ——定子侧输出的有功功率; Q_1 ——定子侧输出的无功功率; P_{cu1} ——定子铜耗; Q_{x1} ——定子漏抗无功功率; P_{cu2} ——转子铜耗; Q_{x2} ——转子漏抗无功功率; P_m ——铁耗; Q_m ——激磁无功功率; m_1 ——定子相数。

又因为 $U_2 = \frac{U_2'}{k_e}$, $I_2 = k_i I_2'$, 且

$$\left. \begin{aligned} k_e &= \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} \\ k_i &= \frac{m_1 N_1 k_{w1}}{m_2 N_2 k_{w2}} \end{aligned} \right\}$$

式中: k_e ——定子、转子电动势比; k_i ——定子、转子电流比; N_1 ——定子每相串联匝数; N_2 ——转子每相串联

匝数; k_{w1} ——定子基波绕组因数; k_{w2} ——转子基波绕组因数; m_2 ——转子相数。

所以转子侧输出有功功率可写为:

$$P_2 = m_1 U_2' I_2' \cos \varphi_1 = 3 U_1 k_e I_1 / k_i \cos \varphi_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (3)$$

忽略双馈电机定、转子的损耗, 定子输入电流频率与转子输出电流频率的比为1:s, 所以转子侧有功功率是定子侧有功功率的转差功率, 即:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P \times \frac{1}{1-s} \\ P_2 &= P \times \frac{s}{1-s} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: P ——发电机输出总功率(在忽略双馈电机定、转子损耗的前提下, 电机输入总机械功率 P_{mec} 等于输出总功率 P)。

因此, 当知道电机实际转速 n 时, 即可得出该转速对应的转差率 s , 同时可由电机所施加的转矩得到总功率 P 。由定子、转子侧输出功率和总功率的关系(式4)即可得到 P_1 和 P_2 。对于MW级双馈风力发电机来说, 其电网侧变流器接在电网上, 故我们可得出一定转速时所对应的定子电流和网侧的电流值, 从而可针对双馈电机在各个工作点的运行状况进行稳态分析。

双馈电机转子侧电流的计算可以采用矢量变换的方法。将同步旋转坐标系的 d 轴与双馈电机定子磁场重合, 逆时针旋转 90° 作为 q 轴的方向(定义 q 轴滞后 d 轴 90°)。这样, 同步旋转坐标系中的定子磁链矢量 ψ_{sdq} 正好落在同步旋转坐标系的 d 轴上, 即在同步旋转 dq 坐标系中定子磁链可表述为:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sq} &= 0 \\ \psi_{sd} &= \psi_d \end{aligned} \right\}$$

则双馈电机在同步旋转坐标系中的数学模型为^[4]:

$$\begin{bmatrix} u_{sq} \\ u_{sd} \\ u_{rq} \\ u_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & \omega_{sl} \\ 0 & 0 & -\omega_{sl} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} ——定子电压的 d, q 轴分量; u_{rd}, u_{rq} ——转子电压的 d, q 轴分量; i_{sd}, i_{sq} ——定子电流的 d, q 轴分量; i_{rd}, i_{rq} ——转子电流的 d, q 轴分量; ψ_{sd}, ψ_{sq} ——定子磁链的 d, q 轴分量; ψ_{rd}, ψ_{rq} ——转子磁链的 d, q 轴分量; ω_s ——同步角频率; ω_{sl} ——转差角频率; i_{ms} ——励磁电流; D ——微分算子。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \psi_s \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: L_s ——定子自感; L_r ——转子自感; L_m ——定、转子间互感。

由式(5)、式(6)可得:

$$\left. \begin{aligned} i_{sq} &= -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ \psi_s &= L_m i_{ms} \\ i_{sd} &= \frac{L_m}{L_s} (i_{ms} - i_{rd}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由电机的转矩方程:

$$T_e = 1.5 p \psi_{sd} i_{sq} = 1.5 p L_m i_{ms} i_{sq} = -1.5 p \frac{L_m^2}{L_s} i_{ms} i_{rq} \quad (8)$$

$$\text{可得: } i_{rq} = \frac{L_s}{-1.5 p i_{ms} L_m^2} \times T_e \quad (9)$$

在忽略定子电阻的情况下, 由电机功率方程可得定子无功功率为:

$$Q_1 = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_{sq} (i_{ms} - i_{rd}) \quad (10)$$

$$\text{当 } \cos \varphi = 1 \text{ 时 } Q_1 = 0, I_{rd} = \frac{U_s}{\omega_s L_m} K \quad (11)$$

式中: K ——定子、转子电压变比。

通过式(9)、(11)可以得到转子 d, q 轴电流, 从而可以计算出转子侧电流^[5]。

3 举例计算

已知双馈风力发电机的参数为: 额定功率1 500 kW, 频率50 Hz, 额定转速1 800 r/min, 同步转速1 500 r/min, 定子额定电压690 V, 电网电压690 V。下面对实际双馈风力发电机的稳态运行特性进行计算(主要考虑双馈风力发电系统在满功率发电时)。

由:

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1800}{1500} = -0.2 \\ P_1 &= P \frac{1}{1-s} = 1\,250 \text{ kW} \\ P_2 &= P \left| \frac{s}{1-s} \right| = 250 \text{ kW} \end{aligned} \right\}$$

得:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{P_1}{\sqrt{3} U_1} = 1\,046 \text{ A} \\ I_n &= \frac{P_2}{\sqrt{3} U_2} = 209 \text{ A} \end{aligned} \right\}$$

网侧变流器并网功率因数为1时, 忽略损耗, 可以认为发电机转子侧有功功率与网侧变流器的有功功率相等。电机定子侧和变流器电网侧的电流分别为1 046 A和209 A。

双馈风力发电机已知的极限转速为2 000 r/min, 即转差率 $s=-0.333$ 的超同步工况时, 发电机转子侧的有功功率达到最大值:

$$P_2 = P \times \left| \frac{s}{1-s} \right| = 1500 \times 0.25 = 375 \text{ kW}$$

由式(9)和式(11), 可得电机的转矩 T_e 、转子 d 轴电流 I_{rd} 和转子 q 轴电流 I_{rq} ^[4]:

$$\left. \begin{aligned} T_e &= \frac{P}{\Omega} = \frac{1500}{2\pi \frac{1800}{60}} = 7\,957 \text{ N} \cdot \text{m} \\ I_{rd} &= \frac{\sqrt{2}U}{\omega_s L_m} K = \frac{\sqrt{2} \times 690}{2\pi \times 50 \times 17.67} \times 0.5922 = 103 \text{ A} \\ I_{rq} &= \frac{I_s \omega_s K}{1.5 U_s p L_m} \times T_e = \frac{T_e}{15.488} = \frac{7957}{15.488} = 514 \text{ A} \end{aligned} \right\}$$

故转子侧电流为:

$$I_2 = \sqrt{I_{rd}^2 + I_{rq}^2} / \sqrt{2} = \sqrt{103^2 + 514^2} / \sqrt{2} = 370 \text{ A}.$$

当双馈风力发电机运行在额定转速之外的转速时, 可以根据上面的计算方法求出定、转子侧的电流和功率, 从而对电机的稳定运行状态进行分析^[6]。

4 仿真分析

双馈风力发电机是一个具有定子、转子和转轴3个端口的机电装置, 其中定子和转子对应的是电压和电流, 转轴对应的是转速和转矩。当任意两个端口确定之后, 第三个端口也随之确定, 在此基础上可以求解整个电机^[7]。对双馈风力发电机的稳态分析进行仿真就是建立在上述条件上。

为了使得仿真结果更加直观易懂, 应用Matlab软件的数据可视化功能进行仿真, 利用plot3(x,y,z)函数和surf(x,y,z)函数, 代入特殊工作点, 就可以用三维空间图仿真出转子电压、电流及功率分别与转速和转矩的关系, 并进行分析。

图4中, 从 xoz 平面来看, 当转矩变化时, 转子电压基本不变(图中色彩的深浅度不变); 从 yoz 平面来看, 当转速变化时, 即转差变化时, 转子电压随之变化, 并且当电机运行在同步转速时, 即转差为0时, 转子电压也为0。

图5中, 从 xoz 平面来看, 当转矩值增加时, 转子电流值随之增加; 从 yoz 平面来看, 当转速变化, 即转差发生变化时, 转子电流大小未发生改变, 这说明转差的变化不会引起转子电流大小的变化。

图6中, 因为转子功率为转子电压和电流的乘积, 所以当电机转速在图形的两端时, 转子功率为最大, 并且当转速为同步转速, 即转差为0时, 转子功率也近似为0。

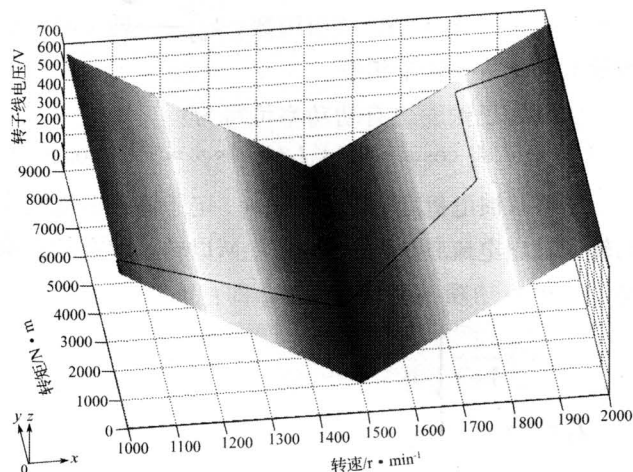


图4 转子电压
Fig. 4 Rotor voltage

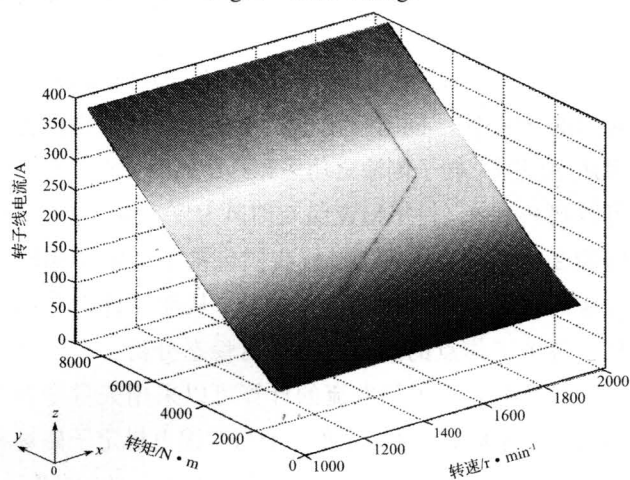


图5 转子电流
Fig. 5 Rotor current

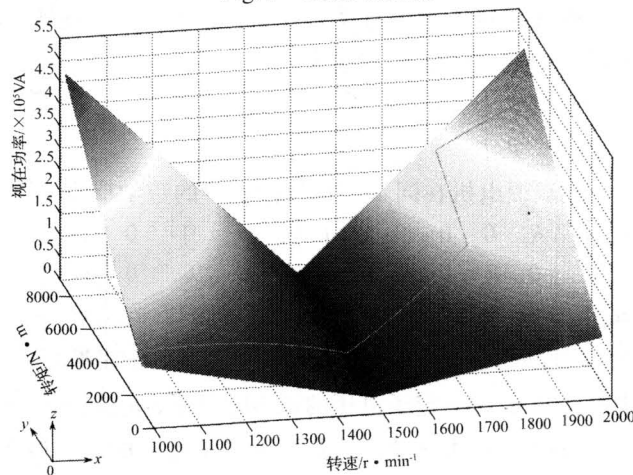


图6 转子功率
Fig. 6 Rotor power

通过仿真得到的转子电压、电流和功率变化的趋势, 在设计双馈风力发电变流器的容量及选择功率器件时可以此作为参考。

5 实验分析

实验中采用的双馈风力发电机额定功率为1 500 kW,

额定转速为1 800 r/min,同步转速为1 500 r/min,电网电压690 V。机组满功率发电时,用示波器在网侧变流器端测得电流波形如图7所示。

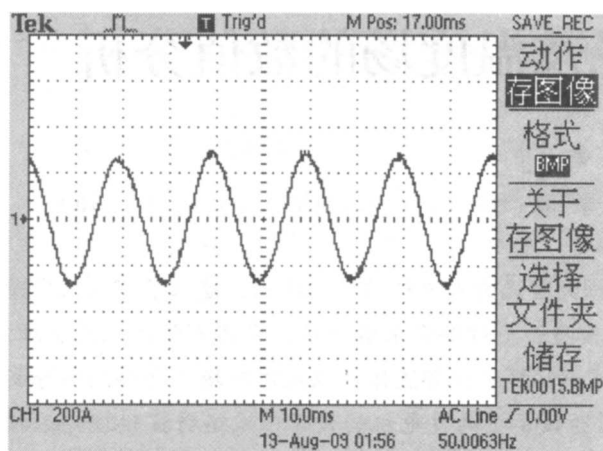


图7 网侧变流器电流波形

Fig. 7 Current waveform of the grid-side converter

从图7可以看出,此时网侧电流峰值约为290 A,其有效值为 $I_n=290/\sqrt{2}=205$ A,与理论计算值相近。所以,此时网侧变流器容量 $P_2=\sqrt{3} \times 690 \times 205=245$ kW。

同样在满功率发电时,在定子侧测得的电流波形如图8所示。

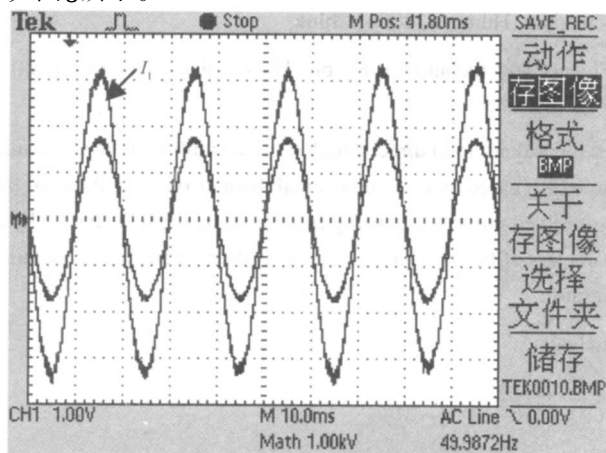


图8 定子电流波形

Fig. 8 Stator current waveform

图8中,幅值较大的波形即为用示波器观测到的定子电流波形,从图中可以读出约为1 550 A,故其有效值 $I_1=1 530/\sqrt{2}=1 082$ A,与理论计算值相近。所以定子侧输出功率 $P_1=\sqrt{3} \times 690 \times 1 082=1 293$ kW。该系统发出的总功率为 $P_1+P_2=1 293$ kW+245 kW=1 538 kW,满足双馈风力

发电系统满功率发电的要求。

图9中,幅值较小的波形为用示波器观测到的转子电流波形图,从图中可以读出约为530 A,故其有效值 $I_2=530/\sqrt{2}=374$ A,与理论计算值相近。

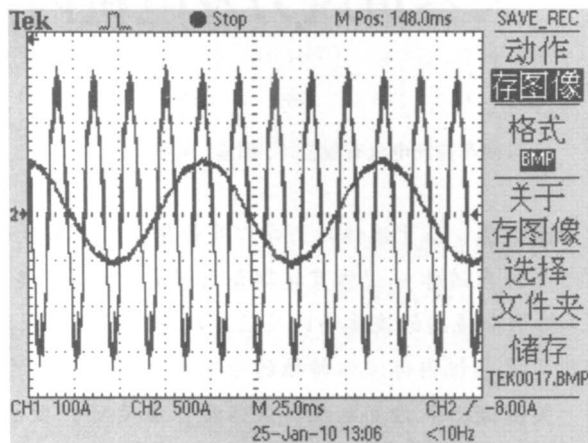


图9 转子电流波形

Fig. 9 Rotor current waveform

6 结语

本文通过对双馈风力发电机稳定运行状态的理论分析和仿真,介绍了双馈电机定子、转子侧电流和功率的计算方法。1.5 MW双馈风力发电机组满功率发电的实验结果证明了所述稳态分析的正确性,这对于实际分析电机的运行状态具有指导意义。

参考文献:

- [1] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频双馈异步发电机的稳态功率关系[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 39-44.
- [2] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [3] 汤蕴璆,史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [5] 苑国峰. 大容量变速恒频双馈异步风力发电系统实现[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [6] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. Electric Power Applications IEE Proceedings, 1996,143(3): 231-241.
- [7] 苑国峰,李永东,柴建云,等. 1.5 MW变速恒频双馈风力发电机组励磁控制系统试验研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 42-47.

(上接第18页)

- [3] Poore R, Lettenmaier T. Alternative design study report: WindPACT advanced wind turbine drive train designs study[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2003.

- [4] Bywaters G, John V, Lynch J, et al. Northern Power Systems WindPACT drive train alternative design study report[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [5] Grauers A. Efficiency of three wind energy generating systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 650-657.