

文章编号:1000-582X(2003)03-0089-06

矩阵式变换器励磁的双馈发电机系统建模与仿真*

肖刚,杨顺昌,廖勇,姚骏
(重庆大学电气工程学院,重庆 400044)

摘要:从交-直-交变换的空间矢量调制方法综合出矩阵式交-交变换器的开关控制规律,建立了矩阵式交-交变换器的仿真模型;根据双馈发电机的数学模型和基于动态同步轴系的双通道多变量反馈励磁控制策略建立了双馈发电机的仿真模型和励磁控制模型,结合矩阵式交-交变换器的仿真模型构成双馈发电机系统的仿真模型;仿真研究了双馈发电机系统的稳态调节特性和暂态特性;仿真研究了双馈发电机感应电势及定、转子电流谐波问题。

关键词:双馈发电机;动态同步轴系;交流励磁;矩阵式交-交变换器;空间矢量调制

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A

双馈发电机的结构与绕线式异步电机相同,转子为三相对称分布的励磁绕组通以对称交流电励磁,且励磁电压的幅值大小、频率、相位、相序都可根据要求加以调节,从而可以控制发电机励磁磁场大小、相对于转子的位置和电机的转速。由于双馈发电机励磁控制自由度的增加,使得该类电机具有超越传统同步发电机的性能:良好的稳定性及转速适应能力;独立的有功、无功调节能力;较强的进相运行能力。因而双馈发电机在解决电站持续工频过电压、变速恒频发电、抽水蓄能电站电动-发电机组的调速等问题方面有着传统同步发电机无法比拟的优越性。双馈发电机高质量的转子变频励磁电源是发电机运行性能及产生高质量电能的保证。

采用矩阵式交-交变换器作为双馈发电机的励磁电源,文献[1-2]指出,该变换器主电路结构简单、负载频率不受限制、可获得正弦波的输入和输出电流、任何负载下都可在接近于1的功率因数下运行、有再生运行能力,且体积小、效率高。文献[3]针对传统的感应电动机变频调速系统研究了一种新的由矩阵式变换器

驱动的电动机调速系统(Matrix Converter - Motor, MCM)。虽然文献[1-3]在矩阵式变换器的电路结构、能量回馈、过电压保护、换流与调制技术等方面进行了大量的研究并已取得了显著的成果,但并未达到完全成熟的程度,特别是将矩阵式变换器与电机作为一个整体进行研究的极为少见^[3],国内对矩阵式变换器的研究尚处在起步阶段。在前期研究的基础上^[4-5],研究了适用于双馈发电机的矩阵式变换器调制技术,在Saber仿真软件的平台下用MAST语言建立了系统的模型,并仿真研究了双馈发电机的稳态、暂态性能及分析了发电机电势及输出电流的谐波,展示了以矩阵变换器为励磁电源的双馈发电机的可行性。

1 电机模型及励磁控制模型

1.1 电机模型

选磁链作为状态变量,定、转子方电压电流正方向均按电动机惯例,电磁转矩与转向相同为正,转差率 s 按转子速度低于同步转速为正,在静止 $d-q$ 轴系下以磁链表示的电压方程和电流方程为^[6]:

* 收稿日期:2002-11-08

作者简介:肖刚(1975-),男,四川蓬溪人,重庆大学硕士研究生。主要从事新型电机及其控制的研究。

$$\begin{bmatrix} v_{d\omega} \\ v_{q\omega} \\ v_{0\omega} \\ v_{d\omega} \\ v_{q\omega} \\ v_{0\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s l_r}{D} + p & 0 & 0 & -\frac{R_s m}{D} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s l_r}{D} + p & 0 & 0 & -\frac{R_s m}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_s}{l_s} + p & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{R_r m}{D} & 0 & 0 & \frac{R_r l_{ss}}{D} + p & -\omega_r & 0 \\ 0 & -\frac{R_r m}{D} & 0 & \omega_r & \frac{R_r l_{ss}}{D} + p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_r}{l_r} + p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{d\omega} \\ \lambda_{q\omega} \\ \lambda_{0\omega} \\ \lambda_{d\omega} \\ \lambda_{q\omega} \\ \lambda_{0\omega} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{d\omega} \\ i_{q\omega} \\ i_{0\omega} \\ i_{d\omega} \\ i_{q\omega} \\ i_{0\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_r}{D} & 0 & 0 & -\frac{m}{D} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l_r}{D} & 0 & 0 & -\frac{m}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{l_s} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{m}{D} & 0 & 0 & \frac{l_{ss}}{D} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{m}{D} & 0 & 0 & \frac{l_{ss}}{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{l_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{d\omega} \\ \lambda_{q\omega} \\ \lambda_{0\omega} \\ \lambda_{d\omega} \\ \lambda_{q\omega} \\ \lambda_{0\omega} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中各符号含义与文献[6]相同。

电机的运动方程为:

$$j \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_L - d \cdot \omega_r \quad (3)$$

其中, j 为电机转动惯量, T_m 为电磁转矩, T_L 为原动机转矩, d 为电机的阻尼系数。

1.2 励磁控制模型

双馈发电机稳态运行时有功功率、无功功率^[5]:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= Y_{11} U_{sd}^2 + Y U_{sd} U'_{rd} \\ Q_1 &= Y_{21} U_{sd}^2 + Y U_{sd} U'_{rq} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)表明,双馈发电机稳态运行时有功功率仅与动态同步轴系 d' 轴上的分量 U'_{rd} 有关,无功功率仅与 q' 轴上的分量 U'_{rq} 有关,控制转子励磁电压相量 U_r 在 d' 、 q' 轴上的投影就可实现稳态运行时有功、无功的解耦控制。从而可导出动态同步轴系下双通道励磁控制模型^[5]:

$$\text{有功: } U'_{rd} = U'_{rd0} + K_p \Delta P + K_s \Delta s \quad (5)$$

$$\text{无功: } U'_{rq} = U'_{rq0} + K_q \Delta Q \quad (6)$$

式(4)、(5)、(6)中各符号意义与文献[5]相同。

2 矩阵式交-交变换器

2.1 三相矩阵式变换器的简化电路

一个由 m 相电源向 n 相负载供电的变频变压一次变流装置可由 $m \times n$ 个双向功率器件排列组成,图1所示为 3×3 功率器件组成的矩阵式变换器,该变换器适用于转子三相对称绕组励磁。由于矩阵式变换器输入端为电压源,因此输入端是不能短路的;输出端的负载是转子励磁电流,由于转子绕组是感性的,因此输出端决不能开路。

定义单个开关函数如下:

$$S_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{导通} \\ 0 & \text{断开} \end{cases}$$

$$j \in \{A, B, C\}, k \in \{a, b, c\}$$

前述对输入、输出电路状态的约束可表示为:

$$S_{ja} + S_{jb} + S_{jc} = 1 \quad j \in \{A, B, C\} \quad (7)$$

按这个限制, 3×3 的矩阵式变换器有 27 个可能的开关状态。

2.2 矩阵式变换器的空间矢量调制

矩阵式变换器的调制方法分为直接调制法和间接

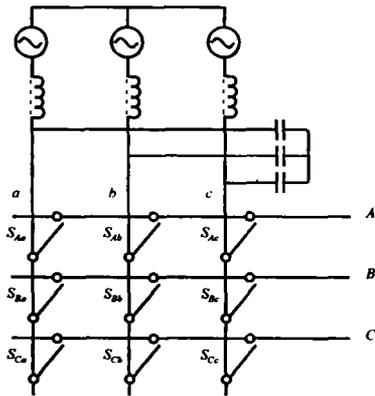


图1 矩阵式交-交变换器

调制法两类。直接调制法是将输出向量表示成由开关函数表示的3阶瞬时变换矩阵与输入向量的乘积,改变功率开关状态,即通断时间,可改变输出向量的频率和大小,然而根据输入量和目标输出量所建立的开关通断时间的计算是非常繁琐的,最大输出电压与输入电压之比只能达0.866倍,调制模型复杂^[1]。典型的间接调制法是根据传统的交-直-交电压型逆变器PWM调制技术建立矩阵式变换器空间矢量调制法(SVM),该方法可用于输出电压和输入电流的控制,调制模型简化^[1]。

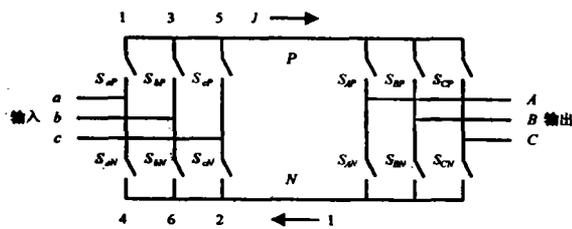


图2 交-直-交变换器

2.2.1 虚拟直流环节的空间矢量调制

矩阵式变换器间接调制技术的主要思想是将矩阵式变换器看成两级变换装置:开关导通期内整流级提供一个恒定的虚拟电压,逆变级根据开关的状态产生3个输出电压,图2为矩阵式变换器间接调制技术的模型。

将PWM技术分别用于整流侧和逆变侧,得到矩阵式变换器双空间矢量调制技术,控制输入电流和输出电压。

根据矩阵式变换器输入、输出电路的约束条件,虚拟整流器同一直流母线P或N上的开关必须有一个且只能有一个导通:

$$S_{ak} + S_{bk} + S_{ck} = 1 \quad k \in \{P, N\} \quad (8)$$

虚拟逆变器同一输出相A、B或C上必须有一个且只

能有一个开关导通:

$$S_{jp} + S_{jn} = 1 \quad j \in \{A, B, C\} \quad (9)$$

由式(8),整流器合法的开关状态共有9种,每种状态下2个开关导通,其余开关断开。对每一状态,按式(10)将三相变换为两相量,再将两相 I_a 、 I_b 合成为一个电流矢量,如表1所示,相应的电流空间矢量图如图3所示。

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

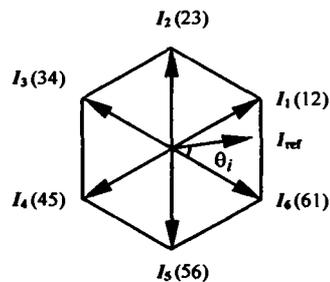


图3 电流空间矢量

表1 整流器开关状态与电流空间矢量

导通	I_a	I_b	I_c	I_α	I_β	$I_\alpha + I_\beta$
1,2	I	0	$-I$	I	$I/\sqrt{3}$	$2I/\sqrt{3} \angle 30^\circ$
2,3	0	I	$-I$	0	$2I/\sqrt{3}$	$2I/\sqrt{3} \angle 90^\circ$
3,4	$-I$	I	0	$-I$	$I/\sqrt{3}$	$2I/\sqrt{3} \angle 150^\circ$
4,5	$-I$	0	I	$-I$	$-I/\sqrt{3}$	$2I/\sqrt{3} \angle 210^\circ$
5,6	0	$-I$	I	0	$-2I/\sqrt{3}$	$2I/\sqrt{3} \angle 270^\circ$
6,1	I	$-I$	0	I	$-I/\sqrt{3}$	$2I/\sqrt{3} \angle 330^\circ$
1,4	0	0	0	0	0	0
2,5	0	0	0	0	0	0
3,6	0	0	0	0	0	0

前6种开关状态形成的电流矢量为有效矢量,后3种为零矢量。按式(10)定义输入相电流参考矢量 I_{ref} ,采用上述9种电流空间矢量来合成 I_{ref} ,就可以得到所需的三相正弦输入相电流。以图3所示 I_{ref} 为例,可以用与 I_{ref} 方向相同的两个相邻电流矢量 I_1 、 I_6 和零矢量来合成,各矢量的作用时间可用开关周期 T_s 中的占空比来表示。

I_1 矢量的占空比

$$\sigma_1 = T_1/T_s = m_i \sin \theta_i \quad (11)$$

I_6 矢量的占空比

$$\sigma_6 = T_6/T_s = m_i \sin(60^\circ - \theta_i) \quad (12)$$

零矢量的占空比

$$\sigma_0 = T_0/T_s = 1 - \sigma_1 - \sigma_6 \quad (13)$$

式中调制系数 $m_i = |I_{ref}|/I$ $0 \leq m_i \leq 1$

2.2.2 矩阵式变换器的空间矢量调制

矩阵式变换器每一个开关状态对应着一个输出向量,这些可能的27个向量可分为3类:第1类是由每一输出相与不同的输入相相联接所产生的幅值恒定、以电源角频率旋转的向量,这种开关状态对应了6个输出空间向量,显然这类空间向量在所研究的空间矢量调制技术中是无用的;第2类是两个输出相与同一个输入相相联接,剩余的一个输出相与其余两个输入相中的一相相联,此时的输出空间向量幅值变化、其方向在彼此位移60°的6个位置中的一个位置上;第3类是3个输出相同时联接到一个输入相,此时输出空间向量的幅值为零,位于圆心。

由式(9),逆变器合法的开关状态共有8种,6种开关状态形成的电压矢量为有效矢量,2种为零矢量。定义输出线电压参考矢量 U_{ref} :

$$U_{ref} = 2/3(v_{AB} + e^{j2\pi/3}v_{BC} + e^{j4\pi/3}v_{CA})$$

用这8种电压空间矢量来合成 U_{ref} ,就可以得到所需的三相正弦输出线电压。

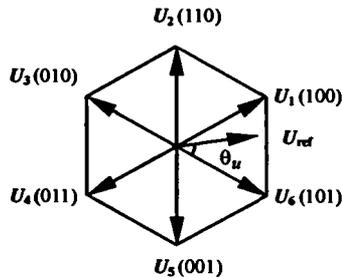


图4 电压空间矢量

由交-直-交变换器中整流器和逆变器的变换关系可导出矩阵式交-交变换器和交-直-交变换器开关函数之间的对应关系:

$$S_{jk} = S_{jP}S_{kP} + S_{jN}S_{kN} \quad (14)$$

$$j \in \{A, B, C\}, k \in \{a, b, c\}$$

$$\text{限定条件: } 1 \leq S_{Gm} + S_{Jn} + S_{Kl} \leq 2 \quad (15)$$

式中 $G, J, K \in \{A, B, C\}, m, n, l \in \{a, b, c\}$

且 $G \neq J \neq K, m \neq n \neq l$ 。

在双空间矢量 PWM 调制实施中,整流器部分的理想输入相电流基准矢量圆和逆变器部分的理想输出线电压基准矢量圆都被划分为6个扇区,从而有36种可能的组合。以图3所示 I_{ref} 和图4所示 U_{ref} 为例,可以用于矢量合成的空间电流、电压矢量分别是 I_6, I_1 和 U_6, U_1 ,两个空间矢量的综合调制采用相互嵌套的办

法来实现,整个输入相电流和输出线电压矢量合成过程共有 $I_6 - U_6, I_6 - U_1, I_1 - U_6, I_1 - U_1$ 及零矢量 $I_0 - U_0$ 5种组合,每一矢量组合的占空比为:

$I_6 - U_6$:

$$\sigma_{66} = m \cdot \sin(60^\circ - \theta_i) \cdot \sin(60^\circ - \theta_u) \quad (16)$$

$I_6 - U_1$:

$$\sigma_{61} = m \cdot \sin(60^\circ - \theta_i) \cdot \sin\theta_u \quad (17)$$

$I_1 - U_6$:

$$\sigma_{16} = m \cdot \sin\theta_i \cdot \sin(60^\circ - \theta_u) \quad (18)$$

$I_1 - U_1$:

$$\sigma_{11} = m \cdot \sin\theta_i \cdot \sin\theta_u \quad (19)$$

$I_0 - U_0$:

$$\sigma_0 = 1 - \sigma_{66} - \sigma_{61} - \sigma_{16} - \sigma_{11} \quad (20)$$

式中调制系数 $0 \leq m = 2U_{om}/(\sqrt{3}U_{im}) \leq 1, U_{im}, U_{om}$ 分别为输入、输出线电压幅值。

3 仿真研究

双馈发电机系统仿真模型的原理框图如图5所示,主要包括双馈发电机、原动机、矩阵式交-交变换器、SVPWM 波形发生器、励磁控制器和有功、无功、转速测量及坐标变换等模型。

在励磁控制器中,根据电机的转速和参数计算出动态同步轴系与同步轴系的相对位置角 δ ,根据 δ 将由式(5)、(6)得出的 U'_{rd}, U'_{rq} 变换到同步轴系下,得 U_{rd}, U_{rq} ,再根据转子位置角 θ_r ,将 U_{rd}, U_{rq} 通过坐标变换得到实际轴系下转子三相励磁电压 u_{ar}, u_{br}, u_{cr} 。SVPWM 波形发生器根据 u_{ar}, u_{br}, u_{cr} 和矩阵式交-交变换器的三相输入电压可算出 m, θ_i, θ_u ,按如式(16)~(20)所示的公式计算开关状态的作用时间,控制开关的导通和关断,就可获得所需转子励磁电压。

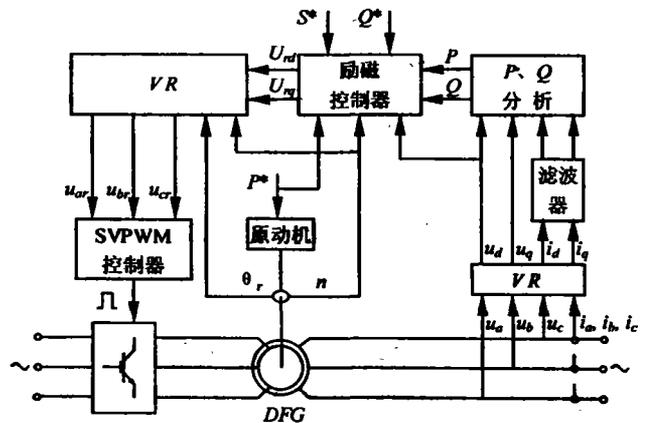


图5 双馈发电机系统原理框图

3.1 有功、无功与转速调节的仿真研究

图 6 为保持无功功率和转速不变,减小有功功率的仿真计算曲线;图 7 为保持有功功率和转速不变,从发出滞后无功功率调节到吸收无功功率的仿真计算曲线;图 8 为保持有功、无功不变,从低于同步转速调节到高于同步转速的仿真计算曲线。

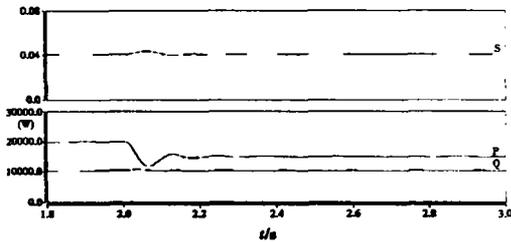


图 6 有功调节仿真曲线

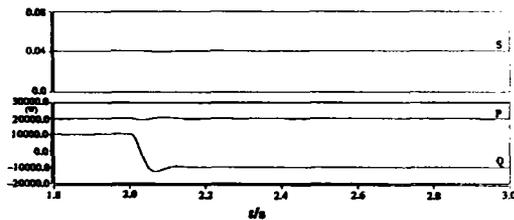


图 7 无功调节仿真曲线

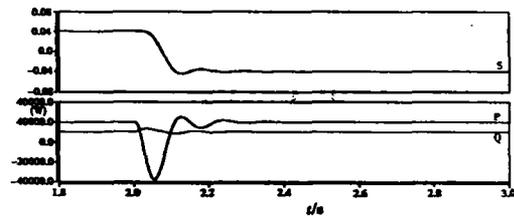


图 8 转差率调节仿真曲线

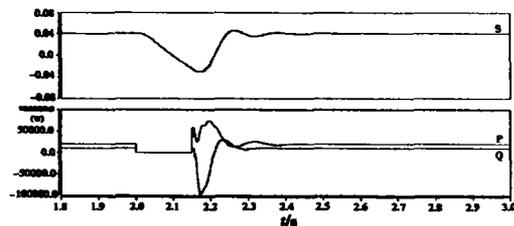


图 9 暂态特性仿真曲线

3.2 暂态特性的仿真研究

图 9 为双馈发电机机端突然三相短路,短路持续 0.15 s 切除故障的仿真计算曲线。由于采用了基于动态同步轴系的励磁控制策略及输出特性优良的矩阵式交-交变换器作为励磁电源,短路故障切除后双馈发电机能迅速趋于稳定,过渡过程结束后其有功、无功和转速都能回到设定值稳定运行,动态品质优良。

3.3 感应电势及定、转子电流的仿真

图 10 是双馈发电机稳态运行时感应电势和定子电流的仿真计算曲线,转子线电压、转子电流的波形如图 11 所示,图 12、图 13 是感应电势和定、转子电流的谐波频谱图(调制频率为 5 kHz)。

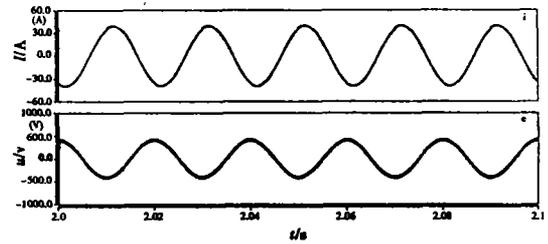


图 10 感应电势、定子电流波形

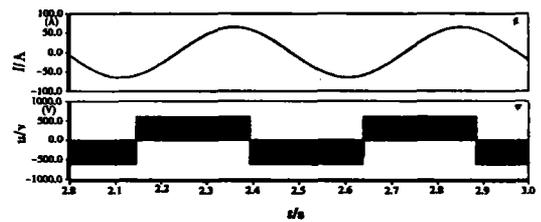


图 11 转子线电压、转子电流波形

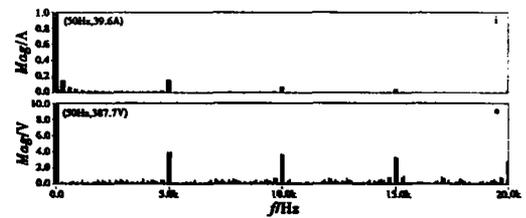


图 12 感应电势、定子电流谐波频谱

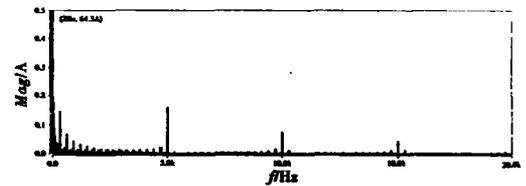


图 13 转子电流谐波频谱

采用双空间矢量调制的矩阵式交-交变换器由于具有优良的输出特性,基波成分大,谐波含量小,使双馈发电机转子电流接近正弦,从而使发电机的感应电势和定子电流正弦性较好。经计算,感应电势波形的正弦性畸变率为 3.9%,小于 5%,符合要求;定子电流、转子电流波形的正弦性畸变率分别为 0.96%、2.4%。

4 结论

在对双馈发电机数学模型、控制策略研究的基础

上,根据矩阵式变换器的工作原理,结合双馈发电机转子励磁的要求,深入研究了矩阵式变换器输入电流和输出电压的控制方法,建立了输入电流和输出电压的空间矢量调制模型,并在 Saber 仿真软件的平台下建立了双馈发电机的系统仿真模型,仿真研究了发电机稳态运行时有功、无功和转速的调节特性及机端突然短路的暂态特性,同时仿真研究了矩阵式变换器输出电流的波形及发电机定子电流和感应电势的波形,并作了相应的谐波分析。仿真结果表明,采用双空间矢量调制的矩阵式变换器作为励磁电源,不仅能保证发电机提供高质量(低波形畸变率)的电能,在解决发电机转子回路能量的回馈问题上有明显的技术、经济优势,因此它将可能成为双馈发电机理想的励磁电源。

附 录

仿真所用电机模型参数:

额定功率:50 hp

额定线电压:460 V

极数:4

定子电阻、漏感:0.087 Ω 、0.801 mH

转子电阻、漏感:0.228 Ω 、0.801 mH

定、转子互感:34.696 mH

转动惯量:1.662 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

定子侧系统联接电感:0.1 mH

参考文献

- [1] PATROCL W WHEELER, JOSE RODR 'IGUEZ, JOR C CLARE, et al. Matrix Converter: a Technology Review [J]. IEEE. Trans. Ind. Electron, 2002, 49(2): 276 - 287.
- [2] JOCHEN MAHLEIN, JÖRG WEIGOLD, OLAF SIMON, et al. New Concepts for Matrix Converter Design [C]. IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Society, 1044 - 1048.
- [3] CHRISTIAN KLUMPNER, PETER NIELSEN, ION BOLDEA et al. A new Matrix Converter-motor (MCM) for Industry Applications [C]. The 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Society, 1394 - 1402.
- [4] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机运行及控制原理 [J]. 电工技术学报, 1997, 12(10): 21 - 25.
- [5] 廖勇, 杨顺昌. 交流励磁发电机励磁控制 [J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 87 - 90.
- [6] 杨顺昌. 参考系理论及感应电动机系统分析 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1987.

Modeling and Simulation of the Doubly Fed Generator with the Matrix AC-AC Converter as an Exciter

XIAO Gang, YANG Shun-chang, LIAO Yong, YAO Jun

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: According to the space vector modulation method of the AC-DC-AC converter, the switch control scheme of the matrix AC-AC converter is deduced, and the model of a three-phase matrix AC-AC converter is constructed. According to the mathematic model of the doubly fed generator and the excitation control principle based on dynamical synchronous reference frame, the simulation model of the generator and excitation controller are established, then the modeling and simulation of the doubly fed generator system with the matrix AC-AC converter as an exciter are implemented. The steady state and transient characteristics of the system are simulated, the harmonics of the EMF and stator, rotor current are researched.

Key words: doubly fed generator; dynamical synchronous reference frame; AC excitation; matrix AC-AC Converter; SVM

(责任编辑 陈移峰)