

矩阵变换器——永磁同步发电机矢量控制系统

王 正, 崔 超

(沈阳工业大学, 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:根据永磁同步发电机(PMSG)矢量控制技术的特点,结合矩阵变换器(MC)和电机矢量控制技术的优点,并采用基于空间矢量调制的 MC 实现对 PMSG 的矢量控制。为有效控制 PMSG 电磁转矩,采用在 PMSG 三相出线端串接电感的控制策略。根据低温余热发电系统要求,搭建 PMSG 矢量控制系统,并进行 Matlab 仿真与实验分析。实验结果证明了 MC 对 PMSG 矢量控制的可行性和稳定性,同时证明了串接电感环节的有效性。

关键词:永磁同步发电机; 矩阵变换器; 转矩控制

中图分类号:TM313

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2013)09-0066-03

Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Generator Fed by Matrix Converter

WANG Zheng, CUI Chao

(College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: According to the vector control of permanent magnet synchronous generator(PMSG), the space vector modulation of matrix converter(MC) is applied into control PMSG. In order to control the electromagnetic torque of PMSG, the inductor is connected to the three-phase terminal side of PMSG. Based on the requirements of the waste-heat recovery power generation system, the block diagram of PMSG vector control system is built. The model of the system is established and the Matlab simulation is taken. The simulation and experimental results show that it's practical and feasible to complete the vector control of PMSG based on the MC, the method of the inductor is also valid.

Keywords: permanent magnet synchronous generator; matrix converter; torque control

Foundation Project: Supported by the Key Technology of Industrial Waste-heat Power Generation System Research (No.F10-049-2-00)

1 引言

随着电力电子技术的高速发展, MC 已成为一种新型 AC/AC 电源变换电路。MC 是一种利用双向开关阵列将电能直接从输入转换到输出的装置, 并通过采用不同的控制策略, 即可实现整流、逆变、斩波和变频等功能^[1-4]。由于 AC/AC MC 可实现输入电流和输出电压波形较好的可控性, 在交流传动系统中有着良好的前景。国内外学者先后对其进行研究, 并取得了一些实质性成果^[5-6]。

矢量控制是一种高效的控制方法, 通过坐标变换将感应电机的数学模型从静止三相耦合坐标系变换到两相旋转坐标系上, 从而通过控制定子电流的励磁分量和转矩分量来分别独立地控制磁链和转矩, 实现近似于直流电机的控制。在低温余

热发电系统中, 采用 PMSG 和膨胀机作为系统的核心部件。膨胀机轴与发电机轴相连, 直接带动发电机工作, 膨胀机工作性能主要受工质流量的影响。通过控制发电机转矩, 并转换为流量, 同时反馈到膨胀机输入端, 从而达到控制膨胀机的目的, 使发电效率转换达到最优。

此处提出 MC 控制 PMSG 的策略, 通过调制 MC 的电压达到对 PMSG 的磁场定向控制。实验验证了该控制系统的可行性、稳定性。

2 矩阵变换器控制策略

2.1 矩阵变换器拓扑结构

三相 MC 是由 9 个双向开关组成的 3×3 开关矩阵, 每个双向开关由 1 个 IGBT 和 4 个二极管组成。图 1 为 MC 主电路。在运行过程中任意时刻, 连接到同一相输出的 3 个双向开关中, 有且仅有一个开关可导通, 而另外两个开关必须关断, 开关函数的约束条件为:

$$S_{ai} + S_{bi} + S_{ci} = 1, \quad i = A, B, C \quad (1)$$

基金项目: 工业余热发电系统关键技术研究(F10-049-2-00)

定稿日期: 2013-04-25

作者简介: 王 正(1962-), 男, 辽宁海城人, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

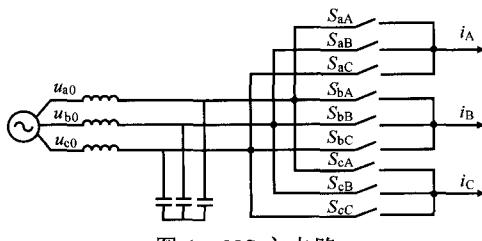


Fig. 1 The main circuit of MC

可将 9 个开关的通断分为 3 类^[7]: ①3 个输出相连接到同一个输入相, 共 3 种情况; ②两个输出相连接到同一个输入相, 另一个输出相连接其他输入相, 共 18 种情况; ③3 个输出相均连接到不同的输入相, 共 6 种情况。

2.2 矩阵变换器间接空间矢量调制

间接空间矢量调制是 MC 常用的一种控制策略, 它将变换器等效为虚拟整流器和虚拟逆变器两个环节, 等效电路如图 2 所示。

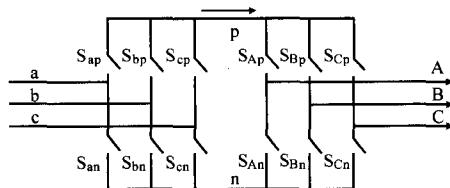


Fig. 2 The equivalent circuit of MC

虚拟的 AC/DC 变换环节对输入电流的空间矢量调制是为了得到可调的输入电流, DC/AC 变换环节对输出电压的空间矢量调制是为了得到频率和幅值可调的电压。根据上述结构, 运用脉宽调制(PWM)方法, 可合成期望的电压和电流。电压、电流空间矢量的变换关系如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (2/3)(U_{AB} + U_{BC}e^{j2\pi/3} + U_{CA}e^{j4\pi/3}) \\ \mathbf{I} &= (2/3)(i_a + i_be^{j2\pi/3} + i_ce^{j4\pi/3}) \end{aligned} \quad (2)$$

由上式可得出 \mathbf{U}, \mathbf{I} 在空间矢量平面中的分布图, 输出电压矢量图如图 3 所示。

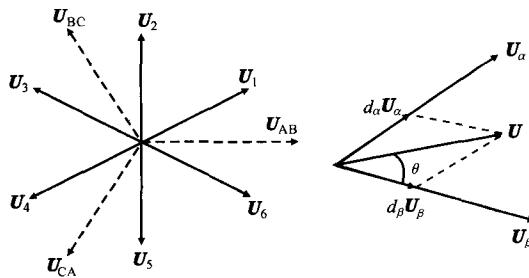


图 3 输出电压矢量合成

Fig. 3 The vector synthesis of output voltage

当逆变器供电时, 某一时刻输出线电压可用其两个相邻电压矢量和零矢量来合成, 采用逼近

圆形的旋转磁场来合成输出线电压。由静止的电压空间矢量可合成旋转的电压空间矢量^[8]:

$$\mathbf{U} = d_\alpha \mathbf{U}_\alpha + d_\beta \mathbf{U}_\beta + d_0 \mathbf{U}_0 \quad (3)$$

式中: d_α, d_β, d_0 为占空比, 分别表示 $\mathbf{U}_\alpha, \mathbf{U}_\beta, \mathbf{U}_0$ 在 1 个调制周期内的比重, $d_\alpha = m_u \sin(\pi/3 - \theta)$, $d_\beta = m_u \sin \theta$, m_u, θ 分别为逆变侧的调制系数和输出电压在各自扇区中的角度, $d_0 = 1 - d_\alpha - d_\beta$ 。

将这两个空间矢量调制过程结合起来即可实现完整的 MC 空间矢量调制。

3 永磁同步发电机数学模型和转矩控制

3.1 永磁同步发电机数学模型

与其他同步发电机相比, PMSG 仅有励磁系统被永磁体替代, 一般同步发电机的公式、方程均适用于 PMSG。在忽略定、转子铁心磁阻、涡流和磁滞损耗, 转子无阻尼绕组的情况下, 运用坐标变换原理, 三相 PMSG 在 d, q 坐标系下定子磁链方程为:

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f, \quad \Psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

式中: L_d 为定子直轴电感; L_q 为定子交轴电感; Ψ_f 为永磁体产生的转子磁链。

定子电压及转矩方程分别为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d di_d/dt - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q di_q/dt + \omega_r (L_d i_d + \Psi_f) \end{cases} \quad (5)$$

$$T_e = n_p [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (6)$$

式中: R_s 为定子绕组电阻; ω_r 为转子旋转角频率。

若 $i_d = 0$, 由式(6)可知, T_e 与 i_q 成正比, 控制定子电流 i_q 即可控制 T_e 。

3.2 控制永磁同步发电机转矩的策略

从上述分析可知, PMSG 的矢量控制实际上是对 i_q 的控制。考虑到 PMSG 转子磁场不可改变和输出电流难以控制等特点, 这里采用了在发电机三相出线端串接电感器的策略, 并通过控制电感器两端的电压间接控制定子电流, 从而达到有效控制转矩的目的。图 4 示出 PMSG 外接电感器的电路图。

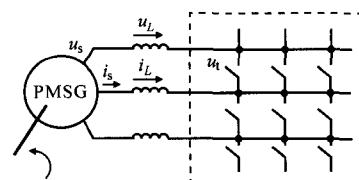


图 4 PMSG 外接电感器电路

Fig. 4 The external inductor circuit of PMSG

定子电流 i_s 即是串接电感器的电流 i_L 。通过灵活控制电压 u_t , 并与发电机端电压 u_s 求和: $u_L = u_s + u_t$, 即实现了对 u_L 的控制。发电机稳定工作时, 电感器电流: $i_L = u_L/L$, L 为电感值。

4 仿真与实验分析

根据上述分析建立 PMSG 矢量控制仿真系统, 并进行波形分析。图 5 示出 PMSG 矢量控制系统的框图。实验所采用的 PMSM 型号为 110ZYT154, 发电机具体参数: $P=0.7 \text{ kW}$, $I=4.2 \text{ A}$, $R_s=2.875 \Omega$, $n=2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $f=50 \text{ Hz}$, $U=220 \text{ V}$, $L_d=L_q=8.5 \text{ mH}$ 。用 Matlab 仿真软件对闭环控制系统模型进行仿真分析, 当 PMSG 负载转矩小于零时, 电机工作在发电状态, 实现了对 PMSG 的模拟, 仿真时间 0.4 s, $L=10 \text{ mH}$ 。

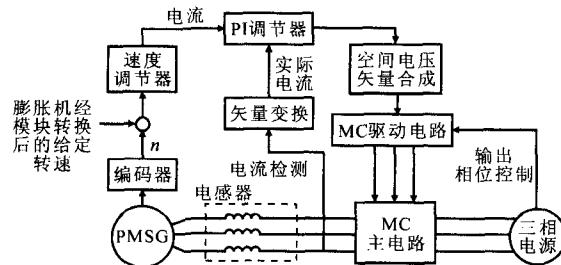


图 5 PMSG 矢量控制系统的框图

Fig. 5 The block diagram of the PMSG vector control system

图 6 示出系统仿真波形。起初发电机负载转矩 $T_L=-5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 膨胀机给定转速值 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 0.2 s 时 $T_L=-10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。从仿真结果可知: ①发电机的直、交轴电流均得到了较好控制; ②转速在达到稳定值前, 存在轻微超调, 转速上升速度较快; ③电磁转矩响应时间短, 负载扰动引起的转矩变化较小; 串接电感器有效改善了发电机的电磁转矩, 满足了系统要求, 性能较好。

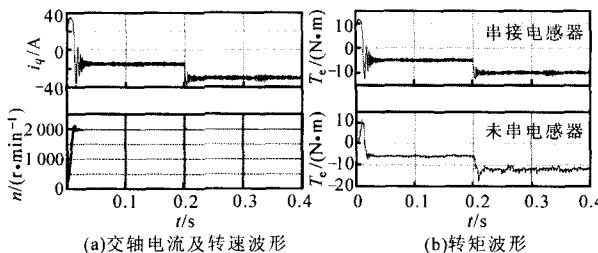


图 6 系统仿真波形

Fig. 6 The simulation waveforms of system

这里在 PMSG 矢量控制系统的基本上进行了稳态运行的实验研究。图 7 为发电机转速实际运

行波形。总体而言, 仿真和实验得到的结果基本一致, 证明了矢量闭环系统的可行性、稳定性。

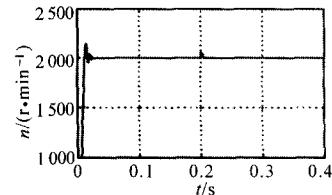


图 7 PMSG 转速波形

Fig. 7 The speed waveform of PMSG

5 结论

这里在矩阵变换器空间矢量调制策略的基础上, 建立了矩阵变换器驱动永磁同步发电机的矢量控制系统, 并采用串接电感器策略实现对发电机电磁转矩的控制。实验证明了该矢量控制系统的可行性, 且有效控制了永磁发电机的电磁转矩, 满足余热发电系统的要求。

参考文献

- [1] Huber L, Borjevic D. Space Vector Modulated Three-phase to Three-phase Matrix Converter With Input Power Factor Correction[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1995, 31(6): 1234-1246.
- [2] 王毅, 陈希有, 徐殿国. 空间矢量调制矩阵变换器闭环控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 164-169.
- [3] 葛红娟, 穆新华, 张绍, 等. 基于矩阵变换器的永磁同步电机矢量控制模型及仿真分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 333-337.
- [4] 余致廷, 刘娟, 张红梅, 等. 矩阵变换器的发展综述[J]. 电源技术学报, 2011, 35(5): 605-607.
- [5] Derfa Chen, Tianhua Liu. Implementation of a Novel Matrix Converter PMSM Drive[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, 2001, 37(3): 863-875.
- [6] Klumpner C, Blaabjerg F. A New Modulation Method for Matrix Converters[A]. In Proceedings of 36th IEEE Industry Applications Society Conference (IAS 2001)[C]. 2001: 2143-2150.
- [7] 陈阔, 李红梅. 交-交矩阵变换器驱动下的 PMSM 矢量控制[J]. 微电机, 2012, 45(5): 64-67.
- [8] 姜鹏志, 张华强, 徐殿国. 矩阵变换器在永磁交流伺服系统中的应用[J]. 节能技术, 2005, 23(5): 396-399.

2013 年第 12 期“功率集成电路及其应用”征文启事

为了更好地促进功率集成电路相关技术的研究与应用, 本刊拟将 2013 年第 12 期辟为“功率集成电路及其应用”专辑。本刊将邀请电子科技大学张波教授作为本专辑的特邀主编, 对本领域的研究及专辑的论文进行分析和点评。详细情况请登录本刊网站 (www.dldzjs.com) 进行查询。