

文章编号:1004-289X(2015)02-0076-05

矩阵变换器在异步电机直接转矩控制中的应用

严肃,王倩营,何登,陈亚东

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:在异步电机直接转矩控制系统中,采用矩阵变换器供电既能实现直接转矩控制的效果,并且还具有矩阵变换器的优点。实现了将矩阵式变换器的空间矢量调制与异步电机基于定子磁场定向的直接转矩控制技术相结合。该控制方式将矩阵式变换器的良好性能和直接转矩控制的优点结合在一起,实现了异步电动机较好的调控性能,提高了交流调速性能并满足节能要求。仿真结果表明:使用该控制策略的调速系统在加减速运行和负载转矩变化等场合均具有良好的动静态性能,为实际研究和设计提供了方便。

关键词:矩阵变换器;异步电机;空间矢量调制;直接转矩控制

中图分类号:TN624

文献标识码:B

Application of Matrix Converters in the Direct Torque Control of Induction Motors

YAN Su, WANG Qian-ying, HE Deng, CHEN Ya-dong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Using matrix converter fed induction motor direct torque control system can realize direct torque control effect and has the advantages of matrix converter. Realized the space vector modulation of matrix converter and asynchronous motor stator magnetic field orientation of the combination of direct torque control. The good performance of matrix converter and the advantages of direct torque control are combined, so get the higher performance control of induction motor and better ac speed regulation performance, and meet the requirements of energy saving. Simulation results show that using the control strategy of speed control system in running, deceleration and load torque changes, etc all has a good dynamic performance, convenience for the actual research and design.

Key words: matrix converter; induction motor; space vector modulation; direct torque control

1 引言

随着微电子技术和电力电子技术的发展,各种电力变换装置陆续得到面世,矩阵变换器作为一种基于双向开关的新型交—交变频器得到了各国学者越来越多的关注,并分别对其进行了大量的研究。

直接转矩控制技术自1985年由德国鲁尔大学Depenbrock教授提出后^[1],迅速发展成为一种主流的交流调控技术。使用矩阵变换器供电的异步电动机,采用直接转矩控制方法,一方面能够较好的实现电机的传动性能,另一方面也可以满足日益严格的电网电能质量的要求^[2],降低谐波污染。但是,在过去的一段时间里,国内外对矩阵变换器的研究主要集中在矩阵变换器自身拓扑结构等一系列问题上,而将矩阵

变换器应用于电机调速系统的研究则相对较少^[3]。

本文实现了一种采用矩阵变换器供电的异步电动机高性能调速系统的直接转矩控制策略。利用该控制策略,可以同时实现矩阵变换器的空间矢量调制算法和异步电动机基于定子磁场定向的直接转矩控制^[4]。通过Matlab/Simulink仿真结果证明,采用上述组合控制策略的交流调速系统,既具有矩阵变换器的良好特性,又具有直接转矩控制技术良好的动静态性能。

2 矩阵变换器控制策略

作为一种含有双向开关的单级电力变换器,矩阵变换器可以通过双向开关将输入侧相电源直接连接至输出侧相负载,是一种直接的AC/AC变换器。矩阵变换器的原理图如图1所示,它的主回路由9个双向

开关组成。每个双向开关都具有双向导通和双向关断的能力,可由两个 IGBT 器件和两个快速恢复二极管构成。

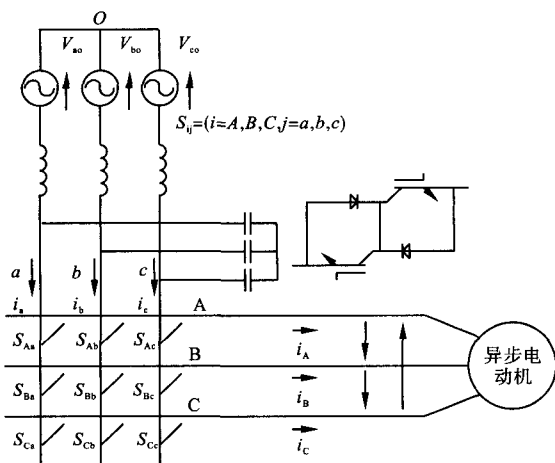


图1 矩阵变换器拓扑和双向开关构成

三相-三相矩阵变换器在理论上可以等效为1个电压源整流器(VSR)和1个电压源逆变器(VSI)的虚拟连接,如图2所示。在整流部分使用空间矢量调制得到正弦输入电流和可调的输入功率因数;在逆变部分使用空间矢量调制得到幅值和频率可调的正弦输出电压,然后将两者合二为一从而实现矩阵式变换器的调制^[5]。

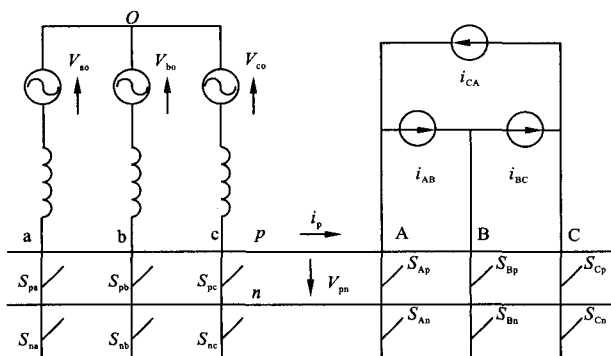


图2 矩阵变换器等效模型

由于矩阵变换器的输入端不能短路,输出端不能短路,所以连至每一输出相的3个开关任意时刻只能有一个闭合,故对于三相-三相矩阵变换器来说,可能的开关状态组合有 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 种。

对任一开关状态,定义输出线电压、线电流的空间矢量为:

$$\vec{u}_o = \frac{2}{3} (u_{AB} + u_{BC} e^{j2\pi/3} + u_{CA} e^{j4\pi/3}) = U_o e^{j\alpha_o} \quad (1)$$

$$\vec{i}_o = \frac{2}{3} (i_A + i_B e^{j2\pi/3} + i_C e^{j4\pi/3}) = I_o e^{j\beta_o} \quad (2)$$

同样,定义输入线电压、线电流的空间矢量为:

$$\vec{u}_i = \frac{2}{3} (u_{AB} + u_{BC} e^{j2\pi/3} + u_{CA} e^{j4\pi/3}) = U_i e^{j\alpha_o} \quad (3)$$

$$\vec{i}_i = \frac{2}{3} (i_A + i_B e^{j2\pi/3} + i_C e^{j4\pi/3}) = I_i e^{j\beta_o} \quad (4)$$

根据相电压与线电压之间的关系,定义输出相电压的空间矢量为:

$$\vec{u}_o = \frac{1}{\sqrt{3}} \vec{v}_o e^{-j\pi/6} = U_o e^{j\alpha_o} \quad (5)$$

以此类推,可得出所有27种开关状态所对应的输出相电压、线电压和输入线电流的空间矢量。可以看出:每个输出电压都与输入电压呈函数关系,每个输入电流都与输出电流呈函数关系。

这27种开关状态可分为三类:第一类6种开关状态的特点是:输入相连接的每个输出相都是不同的;第二类开关状态的开管特点是:在三个输出相中,其中有两个连接的输入相相同,而另一个则连至不同的输入相;第三类的开关状态的特点是:所有输出相都连接到同一输出相。第一组开关各输出电压和输入电流的空间矢量角分别受其输入输出量的影响。所以,对于空间矢量调制(SVM)技术来说,这一组的开关状态是没有意义的。第二组开关的输出电压空间矢量和输入空间电流都具有固定的空间电压矢量角。第三组开关状态产生零输出电压空间矢量和零输入电流空间矢量,称为“零矢量”。因此,第二组和第三组的开管状态可以用于SVM调制算法,如图3所示。

3 DTC 控制原理

根据电机模型方程,定子磁链矢量表示为:

$$\psi_s = \int (V_s - i_s \times R_s) dt \quad (6)$$

式中: ψ_s 为定子磁链矢量; V_s 为定子电压矢量; i_s 为定子电流矢量; R_s 为定子电阻。

在忽略定子电阻压降的情况下,式(6)可以改写为

$$\Delta\psi_s = V_s \Delta t \quad (7)$$

由式(7)可以看出,在一个极短的时间段内,作用某一电压矢量后所产生的定子磁链矢量的改变量与该电压矢量具有相同的方向。

在静止的 $d-q$ 坐标系中,异步电机的电磁转矩方程为

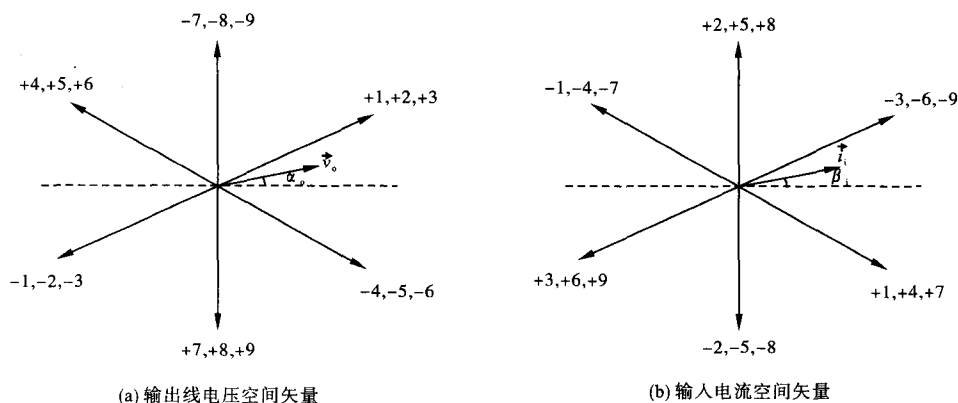


图3 第二组开关状态确定的输出线电压空间矢量和输入电流空间矢量

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (8)$$

式中: n_p 为电机的极对数; ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 分别为 ψ_s 在 d 、 q 轴的分量; i_{ds} 、 i_{qs} 在 d 、 q 轴的分量。另一个有用的电磁转矩公式为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} |\psi_s| |\psi_r| \sin \theta \quad (9)$$

式中: L_s 、 L_r 分别为定子、转子电感; L_m 为互感; σ 为漏感系数; ψ_r 为转子磁链系数; θ 为转矩角, 即转子

磁链矢量跟定子磁链矢量的夹角。

异步电机直接转矩控制是基于电压空间矢量进行分析的。分别画出矩阵变换器的输出电压空间矢量图(图中的中心点是三个“零矢量”)及磁链和转矩控制原理图。用于分析矩阵变换器产生的相电压空间矢量和 DTC 所需的空问矢量之间的关系。这种控制方式的一个很大优点就是输入的功率因数很高, 甚至能达到单位功率因数^[6]。

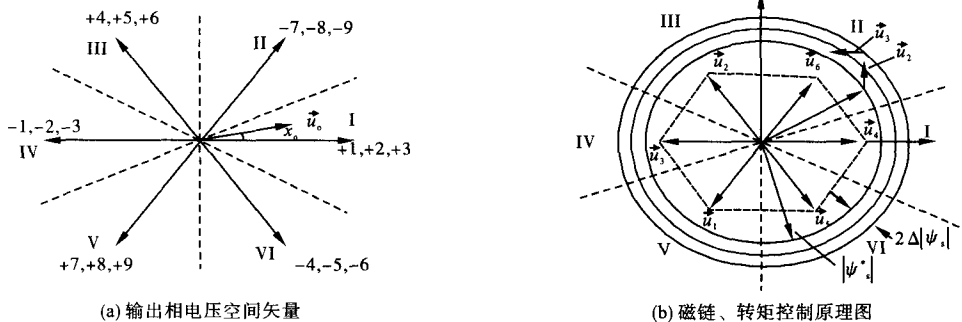


图4 输出相电压空间矢量及磁链、转矩控制原理图

假设在 DTC 算法中给电机施加的是电压空间矢量 \vec{u}_4 , 那么, 对于矩阵变换器, 应施加哪一个对应的输出空间矢量呢? 由上述分析可知, 只有在开关状态为 ± 1 , ± 2 , ± 3 时, 才可产生与 \vec{u}_4 相似(方向相同而幅值不完全相同)的空间矢量, 但这 6 个开关状态输出的相电压的幅值却是取决于输入相电压的。在这 6 个电压矢量中, 应选择与 \vec{u}_4 方向相同, 且幅值最大的一个, 只有同时满足这两个条件的矢量才与 \vec{u}_4 最相似, 并能够在 DTC 算法中与 \vec{u}_4 起着相同作用。

同理, 可以确定 $\vec{u}_1 \sim \vec{u}_6$, 当输入相电压空间矢量在扇区 I ~ VI 时, 分别所对应的最相似的矩阵变换器

的输出相电压空间矢量, 从而就可以确定该时刻矩阵变换器的开关状态。

采用矩阵变换器供电最大的一个优点就是: 只要控制矩阵变换器的输入电压空间矢量和输入电流空间矢量的位置, 即控制它们的角度差在一定的范围内, 就可以实现对系统输入功率因数的控制。

定义 $\Delta\theta_i$ 为矩阵变换器输入相电压空间矢量角与输入电流空间矢量角之差:

$$\Delta\theta_i = \chi_i - \beta_i \quad (10)$$

采用滞环控制技术, 就可实现对功率因数的控制, 如图 5 所示。因每个周期都要计算 $\Delta\theta_i$, 而输入电压往往都含有高频谐波成分, 故 $\Delta\theta_i$ 一般也含有高频谐波,

所以要对其进行低通滤波处理,记为 $\Delta \hat{\theta}_i$ 。将 $\Delta \hat{\theta}_i$ 当作滞环控制器的输入,输出为 $C_{\Delta \hat{\theta}_i}$,当为 $C_{\Delta \hat{\theta}_i}$ “+1”时,表示电压空间矢量超前电流矢量的角度,且超出了一定范围,需减小 $\Delta \hat{\theta}_i$;当 $\Delta \hat{\theta}_i$ 为“-1”时,表示电压矢量落后电流矢量,需要增加 $\Delta \hat{\theta}_i$ 。

故当 DTC 算法要求的空间矢量是 \vec{u}_4 ,当输入相电压空间矢量 \vec{u}_4 在扇区为 I 时,矩阵变换器施加开关状态 +1 和 -3 均能满足 DTC 的要求。但考虑单位功率因数后,如果 $C_{\Delta \hat{\theta}_i}$ 为“+1”,表示电压空间矢量超前电流空间矢量。此时施加一个电流空间矢量大的开关状态就可以迅速减小 $\Delta \hat{\theta}_i$,即选择开关状态 +3 就可以瞬时提高输入功率因数;相反,如果 $C_{\Delta \hat{\theta}_i}$ 为“-1”,则应选择开关状态 +1。

基于以上分析,本控制算法理论上可以实现任意功率因数控制。只要将 $\Delta \theta_i$ 与所需功率因数角之差送入滞环控制器,即可将矩阵变换器输入侧功率因数控

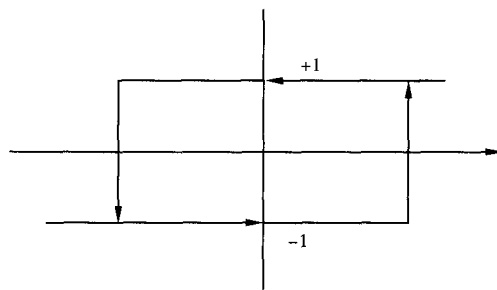


图5 $\Delta \hat{\theta}_i$ 的滞环比较器

制为任意值。同理,如果系统要求输入侧为单位功率因数,而实际输入功率因数角有偏差时,可用此方法实现功率因数的“微调”。综上所述,采用矩阵变换器供电的直接转矩控制系统,不仅满足磁通和转矩控制性能的要求,还能同时满足调节功率因数的要求,而这正体现了该新型调速系统的重要优点。最后将 DTC 算法所需的电压空间矢量和对应矩阵变换器的最优开关状态的关系序列如表 1 所示。

表1 DTC 的电压矢量与 MC 开关状态的对应关系

	θ_1		θ_2		θ_3		θ_4		θ_5		θ_6	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
$C_{\Delta \hat{\theta}_i}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
\vec{u}_4	-3	1	2	-3	-1	2	3	-1	-2	3	1	-2
\vec{u}_6	9	-7	-8	9	7	-8	-9	7	8	-9	-7	8
\vec{u}_2	-6	4	5	-6	-4	5	6	-4	-5	6	4	-5
\vec{u}_3	3	-1	-2	3	1	-2	-3	1	2	-3	-1	2
\vec{u}_1	-9	7	8	-9	-7	8	9	-7	-8	9	7	-8
\vec{u}_5	6	-4	-5	6	4	-5	-6	4	5	-6	-4	5

4 实验仿真分析

为了验证采用组合控制策略的调速系统的性能,本文在 1 台鼠笼式异步电动机上使用 MATLAB 软件进行了仿真研究。电机参数为: $R_s = 0.435\Omega$, $R_r = 0.816\Omega$, $L_s = 0.002\text{H}$, $L_r = 0.022\text{H}$, $L_m = 0.693\text{H}$, 电机极对数 $p = 2$ 。磁链参考值为 $\Psi = 0.56\text{Wb}$ 。整个仿真模型及相关波形如下所示。

图 9 是电机变速运行时电流、转速、转矩响应的波形图,可以看出,矩阵变换器供电的永磁同步电机直接转矩控制系统在短时间内由给定转速(200r/min)变成(-200r/min),电流稳定正弦,且转矩在变速过程中短时间内回复到恒值,且转矩脉动小。

图 10 是电机转矩变动时运行时电流、转速、转矩响应的波形图,可以看出,矩阵变换器供电的永磁同步

电机直接转矩控制系统在短时间内由给定转矩(5N/m)变成(-5N/m),电流稳定正弦,且转速在变转矩过程中短时间内回复到恒值。

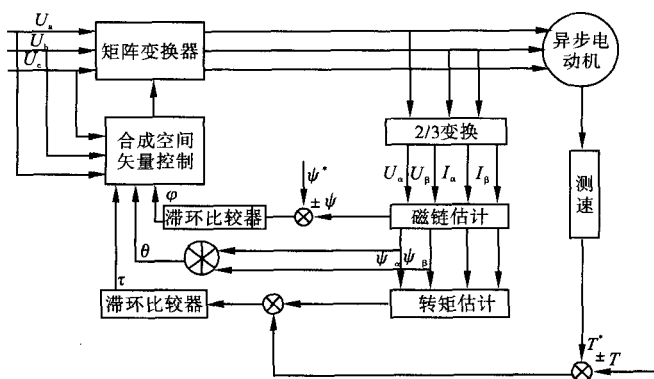


图6 基于矩阵变换器的异步电机仿真模型

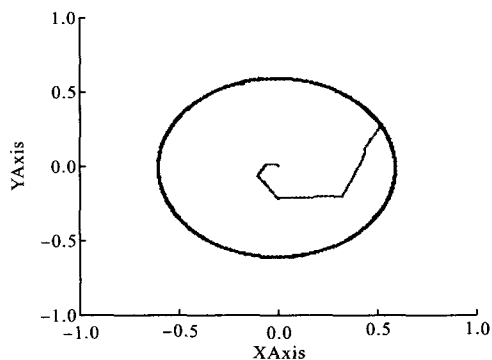


图7 稳态运行时磁链轨迹图

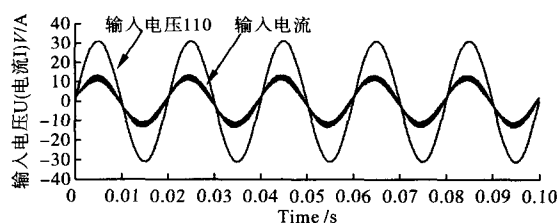
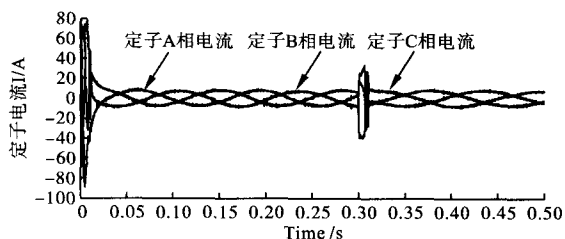
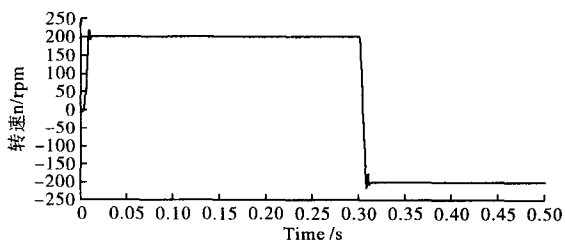


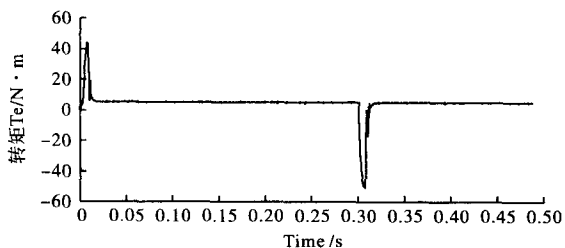
图8 稳态运行时网侧电压电流波形图



(a) 变速运行时定子电流波形图

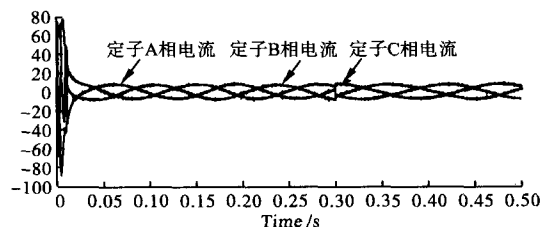


(b) 变速运行时转速波形图

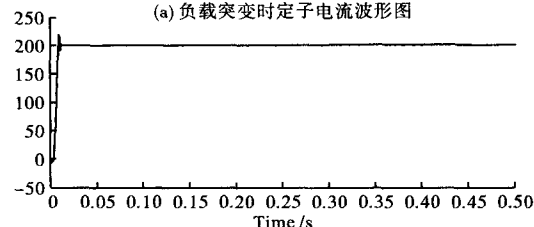


(c) 变速运行时转矩波形图

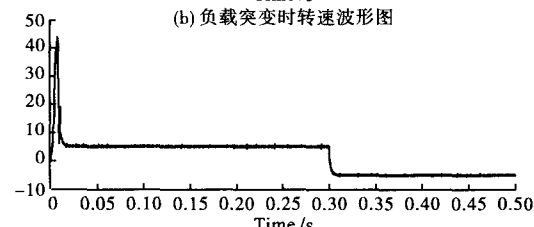
图9 系统速度由(200r/min)跳变为(-200r/min)运行时波形图



(a) 负载突变时定子电流波形图



(b) 负载突变时转速波形图



(c) 负载突变时转矩波形图

图10 转矩由(5N·m)突变为(-5N·m)时仿真波形图

5 结论

本文根据矩阵变换器供电的异步电动机直接转矩控制的基本原理,实现了基于矩阵变换器异步电机直接转矩控制的组合控制策略。该控制策略同时实现了矩阵变换器的空间矢量调制和异步电机基于定子磁场定向的直接转矩控制。仿真结果表明,在电机稳定运行,变速运行变化以及负载突变的条件下,都具有快速、稳定等良好静态特性,能够实现能量双向流动;且矩阵变换器的输入电流和电压具有同相位,保持单位功率因数,降低谐波污染,有利于改善电网质量。

参考文献

- [1] Venturini M. A New Sine Wave in Sine Wave Out Conversion Technique which Eliminates Reactive Elements [A]. Proceeding s Powercon7 [C]. USA; IEEE, 1980; E3-1-E3-15.
- [2] Alesina A, Venturini M. Intrinsic Amplitude Limits And Optimum Design of 9-switches Direct PWM AC-AC Converters [A]. IEEE Proc. of PESC [C]. Kyoto, Japan; IEEE, 1988; 1284-1291.
- [3] 丁伟, 朱建林, 李志勇. 空间矢量调制的矩阵式变换器的仿真模型 [J]. 湘潭大学自然科学报, 2002, 24(3): 100-103.
- [4] 李凤. 异步电机直接转矩控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [5] 孙凯, 黄立培, 松濂贡规. 基于矩阵变换器的异步电机控制 [J]. 清华大学学报, 2004, 44(7): 909-912.
- [6] 唐广笛, 梅柏杉, 朱建林. 一种新型直接转矩控制方法的仿真研究 [J]. 湘潭大学自然科学报, 2003, 25(2): 95-98.

收稿日期: 2014-03-10