

开绕组电机控制系统的共模电压抑制方法研究^{*}

孙 丹, 林 斌, 俞金云

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决单电源供电开绕组交流电机驱动系统存在的共模电压问题,分析了开绕组交流电机驱动系统与常规交流电机驱动系统共模电压的关系,给出了开绕组交流电机端的共模电压表达式,分别针对开绕组交流电机在常规直接转矩控制(DTC)和简化空间矢量调制直接转矩控制(SSVM-DTC)算法下的共模电压抑制问题,提出了电压空间矢量的选取方法,优化了两种控制策略。针对DTC,利用两个逆变器中4组不同空间电压矢量所产生的共模电压为零的特性,选取合适的组合以抑制共模电压;针对SSVM-DTC,将电机端给定电压空间电压矢量分解为两个幅值相等、相位与给定电压矢量互差30°的新电压空间矢量,以达到合成电压空间矢量共模电压为零的目的。仿真结果表明,共模电压的最大幅值会减小至接近于零,远小于原先的幅值,验证了该控制策略的有效性和可行性。

关键词:开绕组电机;共模电压;直接转矩控制;简化空间矢量调制

中图分类号:TM34;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)09-1113-05

Research of common-mode voltage elimination for open-end winding AC motor drive system

SUN Dan, LIN Bin, YU Jin-yun

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to eliminate the common-mode voltage in a single power source open-end winding AC motor drive system, the common-mode voltage expression was determined by analyzing the open-end winding AC motor drive system and the conventional AC motor drive system. A voltage vector selection method was proposed in both direct torque control(DTC) and simplified space vector modulation based direct torque control(SSVM-DTC) strategy. In DTC, the method was fulfilled by selecting the corresponding voltage vectors; and in SSVM-DTC, the method was realized by proportioning the reference voltage vector properly into two vectors with the same amplitude and 30 degree angle apart from the original vector. The simulation results show that the maximum amplitude of the common-mode voltage has been reduced to near zero and much smaller than the original value, which validates the correctness of the proposed control strategies.

Key words: open-end winding machine; common-mode voltage; direct torque control(DTC); simplified space vector modulation(SSVM)

0 引 言

在由PWM变频器驱动的电机系统中,三相PWM输出常存在瞬时不平衡,由此产生的共模电压将引起很多负面效应,如高频共模电压会导致感应电动机轴承损坏,并产生电磁干扰,使得系统可靠性下降。为消除共模电压的影响,传统的做法是在逆变器端加接地变压器对其加以吸收。但变压器占地面积大,为此有

学者通过设计无源滤波器^[1]和有源滤波器^[2]来消除共模电压,都取得了很好的效果。由于近年来多电平逆变器的应用受到越来越多的关注,对于多电平逆变器系统,也有学者通过控制算法的改进来实现共模电压的抑制^[3]。

开绕组交流电机系统可作为多电平逆变器电机驱动系统中的一种^[4],因其结构新颖,控制方式相对简单,受到国内外学者的大量关注。对于开绕组交流电

收稿日期:2013-01-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2011AA11A101);国家自然科学基金资助项目(51377141);中央高校基本科研业务费专项资助项目(ZJU:2012QNA4010)

作者简介:孙丹(1975-),女,辽宁海城人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事交流电机高性能控制策略方面的研究。E-mail: sundan@zju.edu.cn

机驱动系统的共模电压抑制技术,国外已有文献对其进行研究。文献[5-7]针对开绕组异步电机的共模电压以及零序电流,采用合适的电压矢量组合来加以消除,对共模电压的产生以及有效电压矢量的选取作了理论上的分析。

本研究在其基础之上,改进电压矢量的选择方法,实现常规直接转矩控制(DTC)^[8]系统的共模电压抑制,进一步在简化空间矢量调制直接转矩控制(SSVM-DTC)^[9]方式下,提出给定电压矢量分解的方法进行共模电压的抑制。

1 开绕组电机驱动系统的共模电压

单电源供电的开绕组电机驱动系统框图如图 1 所示^[10]。

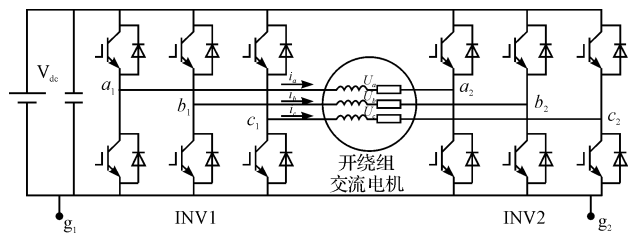


图 1 单电源供电的开绕组电机驱动系统框图
INV1, INV2—两电平电压源逆变器

在常规交流电机驱动系统中,共模电压的表达式为:

$$V_{comc} = \frac{\vec{V}_a + \vec{V}_b + \vec{V}_c}{3} \quad (1)$$

式中: V_{comc} —常规电机定子端的共模电压; V_a, V_b, V_c —一定子三相绕组电压,即逆变器输出端的三相电压。

在开绕组交流电机驱动系统中,由于电机定子绕组两端分别接至一逆变器,则其定子电压为双侧逆变器输出电压之差,其共模电压的表达式将是 INV1 和 INV2 输出端的共模电压之差。

INV1 输出端的共模电压可表示为:

$$V_{com1} = \frac{\vec{V}_{a1} + \vec{V}_{b1} + \vec{V}_{c1}}{3} \quad (2)$$

INV2 输出端的共模电压可表示为:

$$V_{com2} = \frac{\vec{V}_{a2} + \vec{V}_{b2} + \vec{V}_{c2}}{3} \quad (3)$$

则电机端的共模电压为:

$$V_{com} = |V_{com1} - V_{com2}| = \left| \frac{\vec{V}_{a1} + \vec{V}_{b1} + \vec{V}_{c1}}{3} - \frac{\vec{V}_{a2} + \vec{V}_{b2} + \vec{V}_{c2}}{3} \right| \quad (4)$$

式中: V_{com} —开绕组电机定子端的共模电压; V_{com1}, V_{com2} —INV1 和 INV2 输出端的共模电压; V_{a1}, V_{b1}, V_{c1} —

INV1 输出端的三相电压; V_{a2}, V_{b2}, V_{c2} —INV2 输出端的三相电压。

对于采用两个独立直流电源分别供电的开绕组交流电机系统,两电源相互独立,供电方式类似三相三线制。故在电机定子端部虽存在共模电压,但不存在零序电流回路,因此不会有零序电流产生。对于如图 1 所示的采用单个直流电源同时为双逆变器供电的开绕组交流电机系统,其供电方式类似于三相四线制,因此存在共模电压,也存在零序电流回路,如不考虑电压矢量的合理施加,在电机端可能产生相当大的零序电流,带来各种负面影响。因此共模电压的抑制甚至消除相当重要。

由式(4)可知, V_{com} 的大小与两侧逆变器的输出电压有关,因此为抑制共模电压即减小 V_{com} ,研究者在对电机进行控制时,必须充分考虑两逆变器的输出电压矢量对电机的影响,通过采取适当的措施以抑制甚至消除共模电压。

2 共模电压的消除

2.1 共模电压的分析

双逆变器驱动开绕组电机系统的基本电压矢量如图 2 所示。其中,两个两电平逆变器的基本电压空间矢量图(包含 8 个基本电压矢量,即 2 个零矢量以及 6 个有效作用矢量)分别如图 2(a)、2(b)所示。两个逆变器的电压矢量组合而得的电机端综合电压矢量图如图 2(c)所示。由于双逆变器驱动下的电机绕组电压为两侧逆变器输出电压之差,将 INV2 的输出电压矢量反向,即得到如图 2(b)所示的电压矢量。

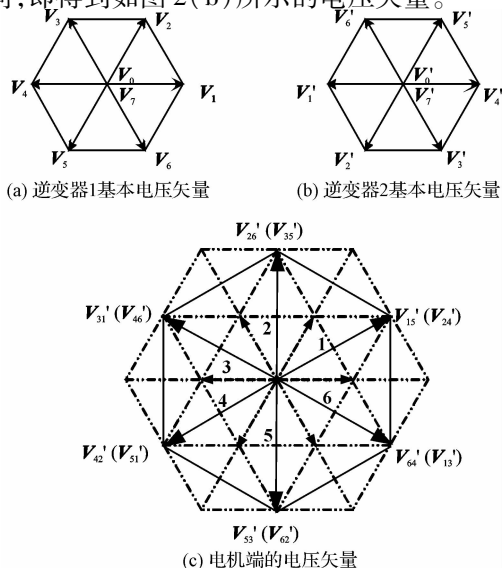


图 2 单电源双逆变器开绕组电机系统电压矢量图

以图2(c)中 V'_{15} 矢量为例, V'_{15} 可由INV1的基本电压矢量 V_1 和INV2的基本电压矢量 V_5 组合得到,与 V_1, V_5 的相位差均为 30° 。

根据INV1输出端共模电压的大小,可将其分为4组:其中 $V_1(100)$ 、 $V_3(010)$ 和 $V_5(001)$ 产生的共模电压大小相同,为:

$$V_{\text{com1}} = \frac{V_{\text{dc}}}{3} \quad (5)$$

$V_2(110)$ 、 $V_4(011)$ 、 $V_6(101)$ 产生的共模电压大小也相同,为:

$$V_{\text{com1}} = \frac{2 \times V_{\text{dc}}}{3} \quad (6)$$

V_0 产生的共模电压为0, V_7 产生的共模电压为 V_{dc} 。

同理,INV2端产生的共模电压也可分成4组。

其中, $V'_1(100)$ 、 $V'_3(010)$ 和 $V'_5(001)$ 产生的共模电压大小相同,为:

$$V_{\text{com2}} = \frac{V_{\text{dc}}}{3} \quad (7)$$

$V'_2(110)$ 、 $V'_4(011)$ 、 $V'_6(101)$ 产生的共模电压大小也相同,为:

$$V_{\text{com2}} = \frac{2 \times V_{\text{dc}}}{3} \quad (8)$$

V'_0 产生的共模电压为0, V'_7 产生的共模电压为 V_{dc} 。

为了使电机端的共模电压最小,可以将两个逆变器生成的电压矢量进行合理组合,即:当INV1选择的电压矢量为 V_1, V_3 或 V_5 时,INV2选择电压矢量 V'_1, V'_3 或 V'_5 ,由式(4,5,7)可知共模电压等于0;当INV1

选择电压矢量为 V_2, V_4 或 V_6 时,INV2选择电压矢量 V'_2, V'_4 或 V'_6 ,由式(4,6,8)可知共模电压等于0;当INV1选择 V_0 时,INV2选择 V'_0 ;当INV1选择 V_7 时,INV2选择 V'_7 。则理论上式(4)都必将等于零。

由图2可知,两个逆变器组合得到的电机端电压矢量是有冗余的,例如,电压矢量 V'_{15} ,可由INV1电压矢量 V_1 与INV2电压矢量 V'_5 组合得到,而INV1电压矢量 V_2 与INV2电压矢量 V'_4 组合得到的 V'_{24} ,与 V'_{15} 矢量大小相等,方向相同,因此完全可以由 V'_{15} 代替。于是得到了一种可使逆变器开关频率减半的办法。即INV1仅采用电压矢量 V_1, V_3, V_5 和 V_7 ,同时INV2仅采用电压矢量 V'_1, V'_3, V'_5 和 V'_7 来实现控制(第一种情况);或者INV1仅采用 V_2, V_4, V_6 和 V_0 ,而INV2仅采用 V'_2, V'_4, V'_6 和 V'_0 来实现控制(第二种情况)。

2.2 DTC中共模电压的消除

根据常规DTC的基本思想,研究者可以通过对磁链和转矩的滞环控制来得到DTC的磁链和转矩增量标志,通过磁链位置来确定其所属扇区,最后通过查表法获得交流电机DTC的基本电压矢量。

在图2所示的单电源开绕组交流电机电压矢量图中,1,2,3,4,5,6表示6个扇区,以前述第一种情况为例,将 $V_{15}, V'_{35}, V'_{31}, V'_{51}, V'_{53}, V'_{13}$ 作为6个基本作用矢量,其作用效果可以保证共模电压为零。根据DTC的电压矢量选择原则,可得扇区选择矢量表如表1所示。当磁链增量大于零时,取 $flux = 1$,当磁链增量小于零时,取 $flux = -1$,当转矩增量大于零时,取 $Te = 1$,当转矩增量小于零时,取 $Te = -1$ 。

表1 单电源开绕组电机驱动系统DTC扇区矢量表

		扇区1($0^\circ, 60^\circ$)	扇区2($60^\circ, 120^\circ$)	扇区3($120^\circ, 180^\circ$)	扇区4($180^\circ, -120^\circ$)	扇区5($-120^\circ, -60^\circ$)	扇区6($-60^\circ, 0^\circ$)
$flux = 1$	$Te = 1$	V_3, V'_5	V_5, V'_1	V_5, V'_1	V_5, V'_3	V_1, V'_3	V_1, V'_5
	$Te = -1$	V_1, V'_3	V_1, V'_5	V_3, V'_5	V_3, V'_1	V_3, V'_1	V_5, V'_3
$flux = -1$	$Te = 1$	V_3, V'_1	V_5, V'_1	V_5, V'_3	V_1, V'_3	V_1, V'_5	V_3, V'_5
	$Te = -1$	V_5, V'_3	V_1, V'_3	V_1, V'_5	V_3, V'_5	V_3, V'_1	V_5, V'_1

$flux$ —磁链增量标志位; Te —转矩增量标志位。

必须指出,采用这种电压矢量组合控制也存在一定弊端。由于采用的组合电压矢量间相位上始终存在 60° 的角度差,导致合成的电压矢量最大值只能到单个逆变器电压矢量的1.732倍。而在双电源逆变器供电开绕组系统中,合成的电压矢量最大值可以达到单个逆变器电压矢量的2倍。

2.3 SSVM-DTC中共模电压的消除

当采用基于空间矢量调制的直接转矩控制策略制(SVM-DTC)时,若采用常规有分区的方式^[11],则可利用上述选择矢量的方法来实现共模电压的抑制,同时

降低逆变器开关频率。当采用无分区的SSVM-DTC控制时,由于不存在基本电压矢量以及扇区的划分,需要用另外的方法来消除开绕组电机的共模电压。

根据SSVM-DTC基本原理,在任意一个控制周期 T_s 内,本研究假定其参考电压空间矢量为 V_s ,则该控制周期内电机的磁链变化量为:

$$\Delta \vec{\psi}_s = \vec{V}_s \times T_s \quad (9)$$

本研究将 V_s 投影到三相定子 abc 坐标系,可分别得到三相定子电压: V_{as}, V_{bs}, V_{cs} ,则一个周期内的磁链变化量可表示为:

$$\Delta \vec{\psi}_s = \vec{V}_{as} \times T_s + \vec{V}_{bs} \times T_s + \vec{V}_{cs} \times T_s \quad (10)$$

假定 T_{as} 为 a 相的有效电压在这一段控制周期内的施加时间, V_{dc} 为直流母线电压值, 显然:

$$V_{as} \times T_s = V_{dc} \times T_{as} \quad (11)$$

T_{as} 即可作为 a 相开关管的触发信号, b 相、c 相可依此类推, T_{bs} 可作为 b 相开关管的触发信号, T_{cs} 可作为 c 相开关管的触发信号。因此 SSVM-DTC 相对于传统的 SVM-DTC 的最大优点就在于无需对矢量进行分区, 无需选择相应的电压空间矢量。

开绕组永磁同步电机 SSVM-DTC 系统的控制框图如图 3 所示。

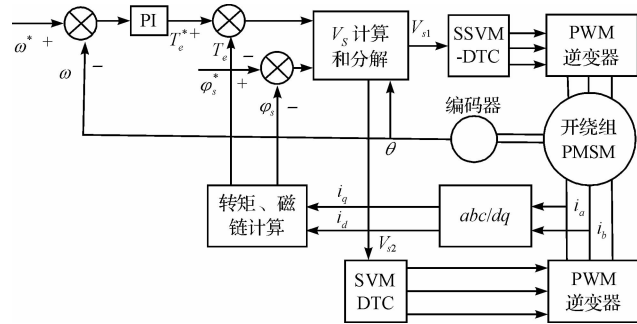


图 3 开绕组交流电机 SSVM-DTC 控制框图

此时, V_s 为电机的电压空间矢量, 其相位角为 θ ; 令 V_{s1}, V_{s2} 分别作为 INV1 和 INV2 的电压空间矢量。则:

$$\vec{V}_s = \vec{V}_{s1} - \vec{V}_{s2} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{cases} \vec{V}_{s1} = \vec{V}_{as1} + \vec{V}_{bs1} + \vec{V}_{cs1} \\ \vec{V}_{s2} = \vec{V}'_{as2} + \vec{V}'_{bs2} + \vec{V}'_{cs2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $V_{as1}, V_{bs1}, V_{cs1}$ — V_{s1} 在三相定子坐标系投影; $V'_{as2}, V'_{bs2}, V'_{cs2}$ — V_{s2} 在三相定子坐标系投影。

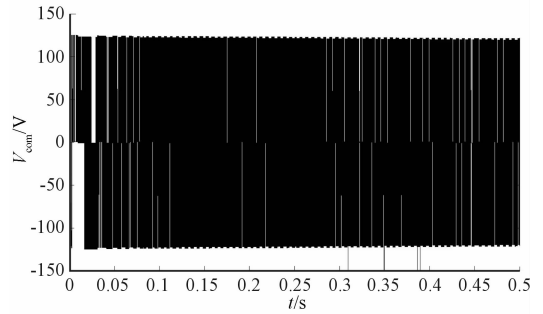
为了抑制共模电压, 要保证 V_{s1} 与 V_{s2} 幅值相同。由前述分析可知, 当两个电压矢量的相位相差 120° 时, 两者相减得到的有效电压空间矢量将不会在电机上产生共模电压(如果两个电压矢量相位差 180° , 同样不会产生共模电压, 但并非有效电压空间矢量)。故可令 $V_{s1}、-V_{s2}$ 的幅值均为 V_s 的 $1/\sqrt{3}$ 倍, 相位分别滞后与超前 V_s 30° , 则此时由于 INV1 与 INV2 的参考电压矢量 $V_{s1}、V_{s2}$ 的幅值相等, 相位相差 120° , 那么, 在任一时刻都有:

$$\begin{cases} \vec{V}_{as1} = \vec{V}'_{cs2} \\ \vec{V}_{bs1} = \vec{V}'_{as2} \\ \vec{V}_{cs1} = \vec{V}'_{bs2} \end{cases} \quad (14)$$

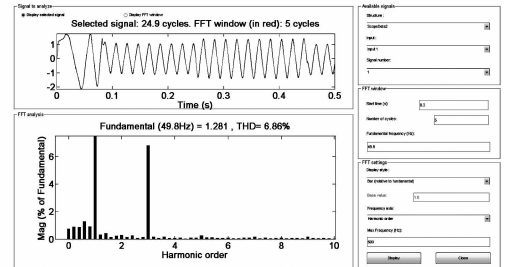
由式(4)可知, 此时 V_{com} 恒等于零, 即任意时刻共模电压都等于 0。

3 仿真研究

以双变换器开绕组永磁同步电机为例, 本研究在 Matlab/Simulink 中对上述 DTC 和 SSVM-DTC 的共模电压抑制方法进行了仿真研究。在 DTC 中, 首先, INV1 与 INV2 选择相同的电压矢量, 仿真得到其共模电压和电流及其 THD 值如图 4 所示, 之后, INV1 与 INV2 的矢量按本研究提出的方法选择, 得到共模电压和电流及其 THD 如图 5 所示。对 SSVM-DTC 的处理方法类似, 得到共模电压和零序电流如图 6、图 7 所示。

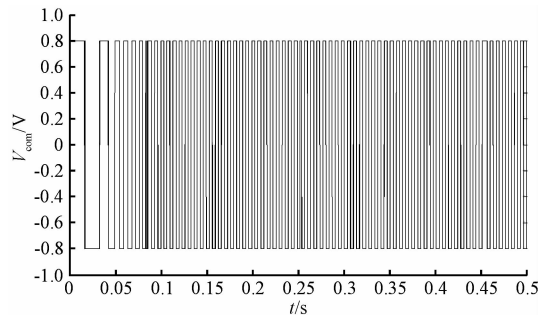


(a) 相同电压矢量DTC下共模电压大小

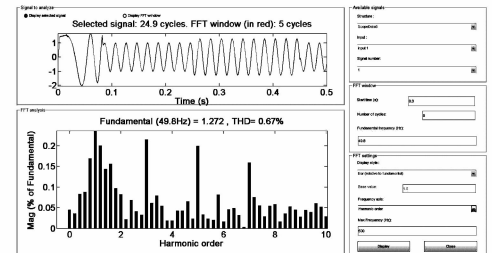


(b) 相同电压矢量DTC下电流THD值

图 4 相同电压矢量下 DTC 共模电压和零序电流

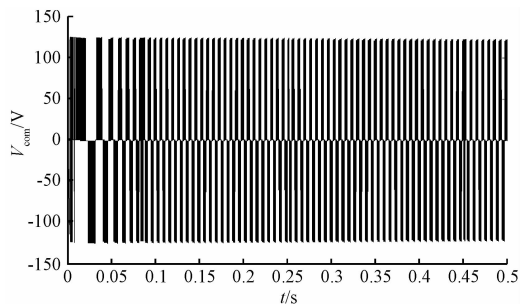


(a) 消除共模电压法DTC下共模电压大小

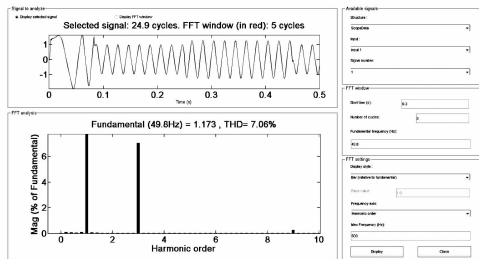


(b) 消除共模电压法DTC下电流THD值

图 5 消除共模电压法 DTC 下共模电压和零序电流

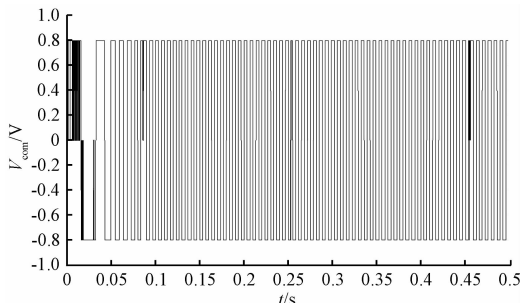


(a) 相同电压矢量SSVM-DTC下共模电压大小

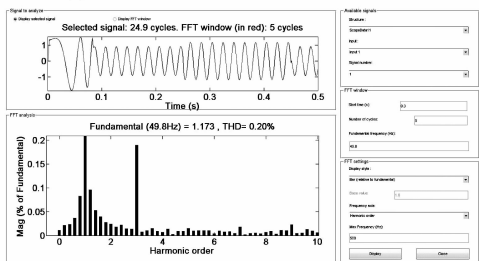


(b) 相同电压矢量SSVM-DTC下电流THD值

图6 相同电压矢量下 SSVM-DTC 共模电压和零序电流



(a) 消除共模电压法SSVM-DTC下共模电压大小



(b) 消除共模电压法SSVM-DTC下电流THD值

图7 消除共模电压法 DTC 下共模电压和零序电流

从图4和图5对比中可以看出,采用相同电压矢量DTC下的共模电压幅值达到了120V,而采用消除共模电压DTC后,共模电压幅值下降到0.8V;而由共模电压产生的零序电流,在相同电压矢量DTC下其THD值达到了6.86%,特别是3次谐波电流,达到了基波电流的6%多,而采用共模电压消除DTC后,零序电流达到了可接受的范围,整体THD值下降到0.67%。

从图6和图7对比中看出,采用相同矢量的SSVM-DTC控制下,共模电压幅值达到120V,而采用消除共模电压SSVM-DTC后,共模电压幅值变为0.8V,基本可以忽略;在相同矢量SSVM-DTC下,电流THD值达到7.06%,其中的3次谐波含量超过基波电流的

6%,在采用共模电压消除SSVM-DTC后,电流THD值下降到0.2%,而3次谐波含量不足基波电流的0.2%,达到可接受范围。

4 结束语

本研究对单电源供电的双逆变器开绕组电机控制系统的共模电压抑制问题进行了研究,在常规DTC方式下,提出了电压空间矢量组合的处理方法,并在SSVM-DTC方式下,进一步指出了参考电压矢量的分解方法,仿真研究结果证明了所提方法对共模电压抑制的正确性及可行性。

参考文献(References):

- [1] 肖芳,孙力,孙亚秀. PWM电机驱动系统中共模电压和轴电压的抑制[J]. 电机与控制学报,2009,13(3):89-94.
- [2] 姜艳姝,于晓洋. PWM驱动系统中的共模电压及抑制[J]. 电机与控制学报,2010,14(4):72-79.
- [3] 杨荣峰,王高林,于泳,等. 减小共模电压的通用多电平SVPWM算法及FPGA实现[J]. 电机与控制学报,2010,14(10):78-83.
- [4] KWABATA T. New Open-Winding Configurations For High-Power Inverters [C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Guimares:[s. n.],1997:457-462.
- [5] SOMASEKHAR V T, SRINIVAS S, GOPAKUMAR K. A Space Vector based PWM Switching Scheme for the reduction of Common-Mode Voltages for a Dual Inverter fed Open-end Winding Induction motor Drive [C]// Power Electronics Specialists Conference. Recife:[s. n.],2005:816-821.
- [6] BAIJU M R, MOHAPATRA K K, KANCHAN R S, et al. A dual two-level inverter scheme with common mode voltage elimination for an induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(3):794-805.
- [7] SOMANI A, GUPTA R K, MOHAPATRA K K, et al. A minimum-Switch Direct-link Drive with Common-mode Voltage Suppression and Active Filtering for Open-End Winding AC Machines [C]// IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes:[s. n.],2008:2889-2893.
- [8] 王宏. 永磁同步电动机直接转矩控制系统的仿真研究[J]. 机电工程,2006,23(4):41-43.
- [9] KUMAR A, FERNANDES B G, CHATTERJEE K. Direct Torque Control of Open-end Winding Induction Motor Drive Using the Concept of Imaginary Switching Times for Marine Propulsion Systems [C]// 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. New York:[s. n.],2005:6.
- [10] STEMMLER H, GUGGENBACH P. Configuration of high-power voltage source inverter drives [C]// Fifth European Conference on Power Electronics and Applications. Brighton:[s. n.],1993:7-14.
- [11] 孙丹,贺益康. 基于恒定开关频率空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12):112-116.

[编辑:李辉]