

# 多电平SPWM变频器中共模电压抑制技术的研究

姜艳姝<sup>1</sup>, 徐殿国<sup>2</sup>, 赵洪<sup>1</sup>, 刘宇<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨理工大学, 黑龙江省哈尔滨市 150080

2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

## RESEARCH ON COMMON-MODE VOLTAGE REDUCTION IN MULTI-LEVEL INVERTER

JIANG Yan-shu<sup>1</sup>, XU Dian-guo<sup>2</sup>, ZHAO Hong<sup>1</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

(1. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang Province, China;

2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China )

**ABSTRACT:** PWM technology for common-mode voltage reduction in three-level inverter is investigated whereas common-mode voltage generated by two-level inverter can only be reduced by an additional filter. With effective on-off states in three level inverter, common-mode voltage generated by three-level inverter is analyzed, then a conclusion is gained that common-mode voltage can be reduced by using software in odd-level inverter. Reducing and canceling common-mode voltage methods are presented using SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation). Simulation results validate their correctness. A comparison is also made among their effects on motor performance, and then usability of the proposed methods is analyzed.

**KEY WORDS:** Electric power engineering; Common-mode voltage; SPWM; Three-level inverter

**摘要:** 鉴于两电平变频器输出的共模电压只能依靠外接滤波器进行消除, 研究了多电平PWM变频器中共模电压的抑制技术。利用多电平变频器的有效开关状态, 分析了多电平变频器中产生共模电压的原因, 得出奇数电平变频器可以通过软件的方法来抑制共模电压的结论。针对常用的变频器控制策略—SPWM, 提出了降低和消除共模电压的改进策略, 并用仿真结果验证了其正确性。文中还给出了不同的调制策略对电动机性能影响的比较, 验证了所提策略的可用性。

**关键词:** 电力工程; 共模电压; 正弦脉宽调制; 三电平逆变器; 正弦型脉宽调制

## 1 引言

传统的两电平 PWM 变频器在电动机绕组中产

基金项目: 国家自然科学基金项目(50377008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50377008).

生的共模电压会导致电动机和驱动系统出现负面效应<sup>[1-3]</sup>, 即共模电压通过静电耦合在转子和机壳间建立起轴电压, 当轴电压超过轴承润滑剂绝缘能力时将产生过大的轴承电流。轴承电流可以使电动机轴承过早损坏。同时, 共模电压产生非常大的共模漏电流, 通过定子绕组和接地机壳间的静电耦合流入地。可产生足够大的共模电磁干扰, 还会使漏电流保护继电器误动作。

现有的消除技术一般用于轴承电流和传导电磁干扰的抑制, 而很少能直接和成功地应用到共模电压的抑制上。文献[4-7]中提出的滤波器可以直接用来抑制共模电压, 抑制效果非常显著, 但要求共模变压器必须足够大。而多电平 PWM 技术在抑制共模电压方面的相关文献更少。除了硬件方法, 从控制策略上, 文献[8]引入空间矢量算法, 通过使整流器和变频器的开关序列同步化, 电动机定子绕组中性点对地电压可降低到  $2V_{dc}/3$ , 但这种方法需要用在可控整流变频器, 不适用于应用到二极管变频器中。而后的应用范围更广。

本文将讨论多电平变频器中共模电压的抑制方法, 并采用 Matlab 仿真软件来验证该方法的有效性。多电平 PWM 变频器常见结构是二极管嵌位型多电平变频器 NPC (Neutral-Point-Clamped), 飞跨电容型多电平变频器和级联式变频器, 常用于中压等级(2300/4160V)装置以降低功率开关器件的额定电压, 进而降低输出电压中的谐波成分。本文中以二极管嵌位型多电平变频器为例分析共模电压的抑制技术, 其结论可以推广到其它结构中。

## 2 多电平变频器输出中的共模电压

传统两电平变频器每相输出为 $\pm V_{dc}/2$ ，其三相有效开关状态为 8 种。根据共模电压的定义<sup>[1]</sup>可知，上述开关状态所对应的共模电压均不为零，为 $\pm V_{dc}/6$  和 $\pm V_{dc}/2$ ，其共模  $dv/dt$  为 $\pm V_{dc}/3$ ，即对两电平变频器而言，不能从控制策略角度完全消除变频器输出的共模电压，共模电压是两电平变频器输出电压中存在的必然现象。其结论同理可推广到具有偶数倍的多电平变频器中。

对于三电平变频器，如三电平 NPC 变频器，其结构如图 1，由 12 个开关和 12 个反并联二极管及 6 个嵌位二极管组成。与传统两电平变频器相比，NPC 有两个明显优点：① 在每个桥臂上串联 4 个开关，使关断状态下的开关承受直流母线电压的一半，而不像两电平变频器中的开关承受全压；② 每相输出电压中包含 3 个电平，即 $\pm V_{dc}/2$  和 0，使变频器输出更接近正弦波，有利于降低输出电压中的谐波。电压电平数量的增加使开关有效状态增加到 27 个，如图 2。将这些开关状态带入共模电压的定义公式中可知，三电平变频器也会产生共模电压，共模电压的幅值为 $\pm V_{dc}/6$ ， $\pm V_{dc}/3$  和 0，其  $dv/dt$  为  $V_{dc}/6$ 。但在这些开关状态中，有 7 种状态不会产生共模电压，即(+0-)，(0+-)，(-+0)，(-0+)，(0-+)，(+10)和(000)。如果将变频器的开关状态限制在这 7 种中，NPC 变频器将不产生共模电压。

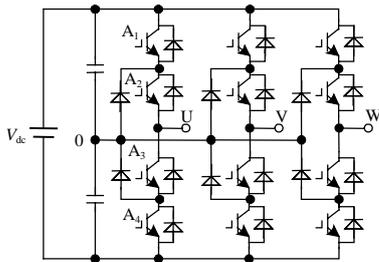


图 1 NPC 变频器  
Fig. 1 NPC inverter

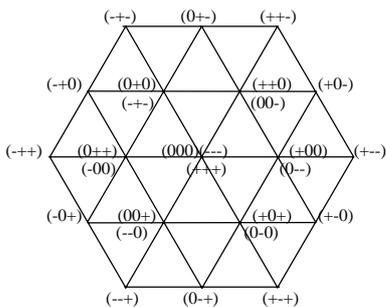


图 2 三电平变频器开关状态  
Fig. 2 Three-level Switching states

这是一个非常有用的结论，即共模电压在三电平变频器中是可消除的。同理，这个结论可推广到具有奇数倍的多电平变频器中。

和传统变频器一样，多电平变频器控制的主要目的是使输出电压尽可能接近期望的正弦波。尽管许多调制策略已经被用于减少谐波和减低开关损耗，传统的 SPWM 对多电平变频器仍是较好的选择，也广泛用于多电平变频器的控制之中。因此，本文将利用上面的结论详细讨论 SPWM 在三电平变频器中抑制共模电压的方法，该方法还可推广到奇数倍电平变频器中。

## 3 三电平逆变器的 SPWM 控制

### 3.1 传统的三电平 SPWM 对共模电压的抑制作用

本节主要讨论 SPWM 方法在三电平变频器控制中的应用。通过传统的 SPWM 方法与本节提出的用以抑制共模电压的 SPWM 方法进行比较，并从电动机转速和转矩角度评价不同的 SPWM 控制方法对电动机运行产生的影响，以验证所提方法的有效性及其可用性。

SPWM 由于其原理简单和谐波失真较低的特性广泛用于传统的两电平变频器中。同样，这种方法扩展到多电平变频器控制的应用中时，对  $N$  电平变频器每相应采用 $(N-1)$ 个三角载波信号，相应的正弦调制信号只采用 1 个。

传统三电平变频器中一相的 SPWM 控制策略为一个正弦波和幅值相等、相位相同、位置相差一个幅值的两个三角波进行比较得出的三电平变频器一相桥臂中 4 个开关管的控制信号波形。正弦调制信号分别前后移动  $2\pi/3$ ，就可得到其它两相开关管的控制信号。应用这些信号就可控制图 1 所示的三电平变频器，使其带动负载进行工作。

下面用仿真分析手段得出传统 SPWM 控制下三电平变频器工作情况。采用 Matlab6.0 仿真软件。

图 3 是三电平变频器输出各类电压的波形，为图 1 的仿真结果。图 3 (a)为相电压波形，相电压中包含 3 种电平： $\pm V_{dc}/2$  和 0。比两电平变频器输出的相电压中多出一个电平；图 3 (b)为线电压波形，比两电平输出线电压波形更接近正弦波，因而谐波含量降低；图 3 (c)为变频器输出的共模电压波形，可见三电平变频器也会产生共模电压，其  $dv/dt$  是母线电压的  $1/6$ ；而两电平变频器输出的共模电压是母线电压的  $1/3$ ，即三电平技术使共模  $dv/dt$  降低

了一半, 有利于降低共模电压的负面效应。共模电压的最大值由原来的  $|\pm V_{dc}/2|$  降到  $|\pm V_{dc}/3|$ , 其有效值也得到了降低。但是由于三电平变频器输出共模电压中的  $dv/dt$  和其幅值仍很大, 对电动机的负面影响仍不可忽略, 必须设法消除之。在仿真过程中未出现电容电压不平衡现象。文献[9]给出了在三电平变频器中可以保持电容电压平衡的原因。

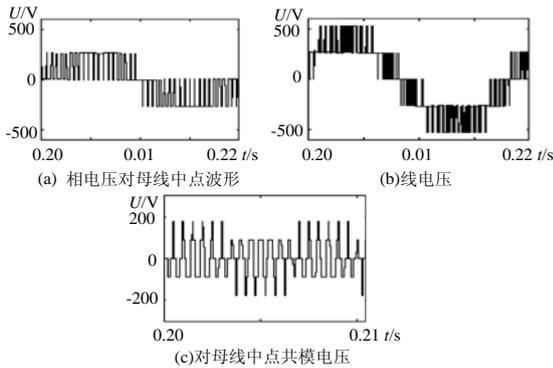


图 3 传统 SPWM 控制下三电平变频器的电压波形

Fig.3 Three-level inverter voltage with conventional SPWM

尽管传统的三电平 SPWM 方法降低了输出电压中的谐波成分, 同时共模电压也有所降低, 但由于变频器的开关状态包含所有的开关状态, 如前所述, 变频器输出中包含了非零的共模电压。

### 3.2 降低共模电压的三电平 SPWM 对共模电压的抑制作用

由于 SPWM 产生的共模电压对系统的负面效应非常显著, 对系统的正常运行带来了负面影响。本节提出了降低共模电压的 SPWM 控制策略。

首先分析一下传统三电平 SPWM 产生共模电压的原因, 如图 4 所示。以图 4(a)所示时刻为例, 在三电平一个开关周期内, 在参考轴 0 的上部, 如果调制波幅值大于载波幅值, 输出相电压为 1, 否则为 0; 在参考轴的下部, 如果调制波幅值大于载波幅值, 输出相电压为 0, 否则为-1。

将三相开关状态组合在一起就形成图 2 所示的各种状态。将这个关系带到共模电压定义公式中, 就得到相应的共模电压  $V_{cm}$ 。由于此时图中包含了 7 种状态以外其它开关状态即(0, -1, -1), (0, 0, -1)和(1, 0, 0), 共模电压就会产生, 但已经比两电平下的共模电压小多了。这是用开关状态来描述共模电压的产生问题。由于共模电压是由开关状态决定的, 因此本节提出一种尽量使开关状态在 7 种状态之内的方法。如图 4(b)所示, 在一个周期内, 仍采用两个载波信号, 但与图 4(a)不同的是这两个载波信号的相位相差  $\pi$ 。采用与上述相同的分析方法,

得出在这种条件下的共模电压  $V_{cm}$  波形。与图 4 (a) 比较, 共模电压绝对值的最大值由  $V_{dc}/3$  降到  $V_{dc}/6$ , 即这种方法可降低共模电压有效值, 从而减轻共模电压的负面效应, 但对共模  $dv/dt$  无效。图 5 为采用本节方法仿真的结果。

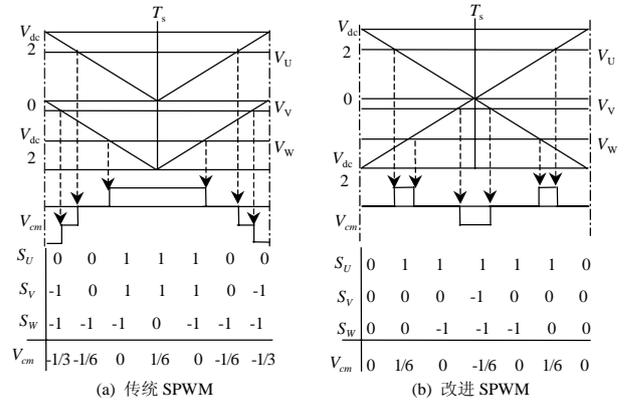


图 4 SPWM 产生共模电压原理

Fig. 4 Common-mode voltage generated by SPWM

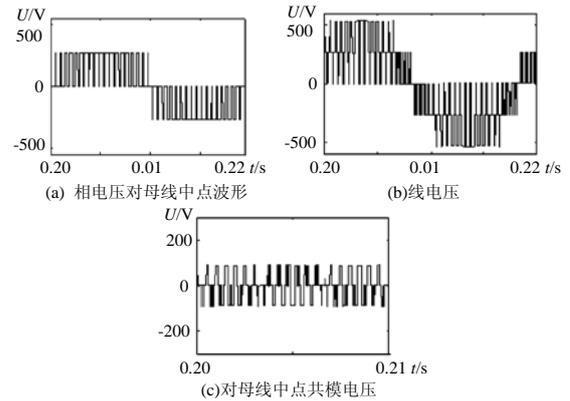


图 5 用于降低共模电压的 SPWM 控制下的三电平变频器的输出电压波形

Fig. 5 Three-level inverter output voltage with SPWM for common-mode voltage reduction

图 5 (a) 为变频器输出的相电压; 图 5 (b) 为变频器输出的线电压; 图 5 (c) 所示的共模电压波形的幅值比图 3 (c) 的幅值小, 将图 3 (c) 中的共模电压最大值消除了, 因此共模电压的降低效果显著。

### 3.3 消除共模电压的三电平 SPWM 对共模电压的抑制作用

上一节中的 SPWM 技术虽然可以降低共模电压的负面效应, 但由于共模电压没有完全消除, 其负面效应仍就存在, 共模  $dv/dt$  也没有得到降低。本节提出另外一种 SPWM 方法解决这个问题。

可以消除共模电压的 SPWM 与传统的两电平 SPWM 相似, 即只采用一个三角载波和三相对称正弦调制波进行比较得出控制信号。但是具体实现的方法与两电平 SPWM 不同。

具体实现方法：首先，将三相正弦调制波中的两相分别与三角载波进行比较，如 U 相和 V 相，得出两个 PWM 中间信号  $V_1$  和  $V_2$ 。然后计算  $(V_1 - V_2)$  得出三电平变频器的一相相电压波形。由相电压的波形就可以确定变频器的控制信号了。相同的方法计算其它两相。由式(1)可知共模电压为零。

$$V_{com} = (V_U + V_V + V_W) / 3 = [(V_1 - V_2) + (V_2 - V_3) + (V_3 - V_1)] / 3 = 0 \quad (1)$$

该方法得到的 SPWM 控制信号控制三电平变频器工作，得图 6 所示的变频器输出的各类波形。

图 6(a)为变频器输出的相电压；图 6 (b)为变频器输出的线电压波形；图 6 (c)所示的共模电压波形的幅值比图 5(b)的幅值更小，消除共模电压的效果非常显著；剩余的毛刺电压是由于开关管的导通关断过渡过程产生的。总体来说，这种方法是可以达到消除共模电压的目的。

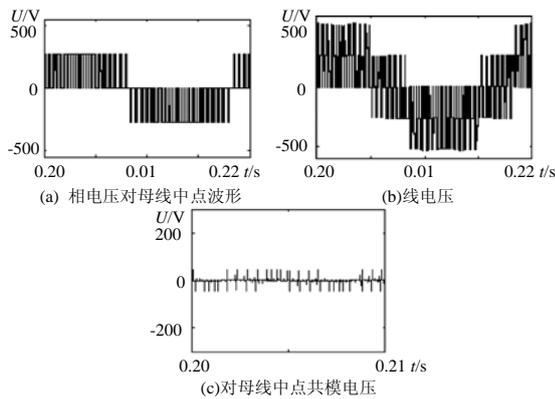


图 6 用于消除共模电压的 SPWM 控制下的三电平变频器的输出电压波形

Fig. 6 Three-level inverter output voltage with SPWM for common-mode voltage cancellation

### 3.4 SPWM 对共模电压抑制效果比较

以上分析可看出，变频器采用多电平结构，通过适当调整调制策略也可达到抑制变频器输出共模电压的目的。为评价本文提出的多电平变频器 SPWM 策略的性能，本节将这几种方法与传统的两电平 SPWM 进行比较，分析共模电压抑制情况和差模电压谐波抑制情况。比较条件与仿真条件相同。

上述几种方法产生的差模电压和共模电压的 FFT，以确定这几种方法产生的谐波含量，如图 7。图 7 还给出了两电平变频器输出的差模电压和共模电压的 FFT，目的是与三电平进行比较得出两者在降低共模电压问题上的不同之处。可见，传统三电平技术的差模电压的谐波含量最小，降低共模电压的三电平技术产生的谐波含量比传统三电平技术

的多，但比两电平的少，而消除共模电压的三电平技术产生的谐波与两电平技术的相当。三电平技术产生的共模电压谐波成分比两电平的少，即采用多电平技术是降低共模电压的良好手段，其中消除共模电压的三电平技术产生的共模电压的 FFT 中几乎看不到谐波成分，效果最好，降低共模电压的三电平次之；两电平产生的共模电压谐波成分最多。

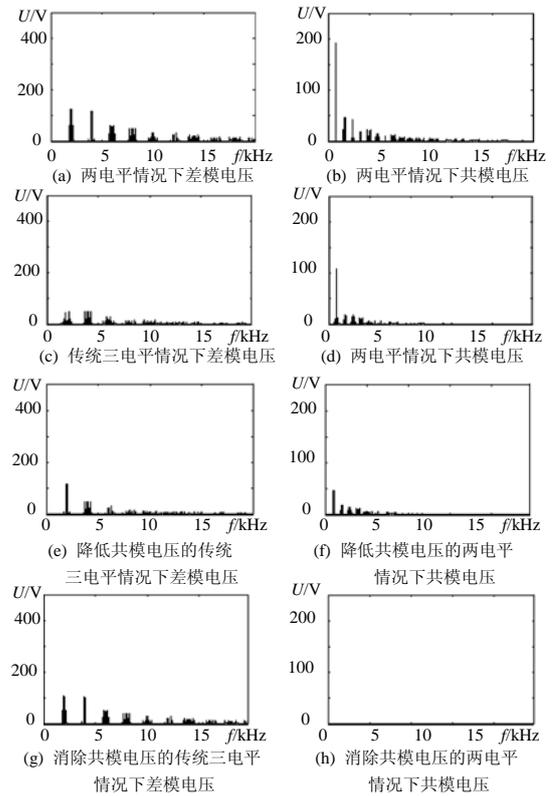


图 7 几种 SPWM 控制方法下 FFT 比较

Fig. 7 FFT comparison with different SPWM controls

将变频器输出共模电压相关参数的比较如图 8 表示。从图中可以看出，多电平技术使变频器输出的共模  $dv/dt$  降低了 1/2，共模电压的幅值降低幅度大，其有效值最后几乎将为零，即采用消除共模电压的 SPWM 技术可以几乎完全抑制共模电压，消除共模电压负面效应的作用最明显。

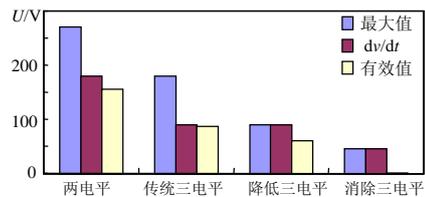


图 8 共模电压比较

Fig. 8 Comparison of common-mode voltage

图 9 为变频器输出线电压相关参数的比较：采用三电平技术使变频器输出的总谐波含量 THD 大

大减小,但采用消除共模电压的三电平使三电平技术的这一优势不存在,原因是变频器中的零序分量不存在。同时对线电压的基波幅值和有效值均降低幅度较大,影响电动机驱动系统的运行。

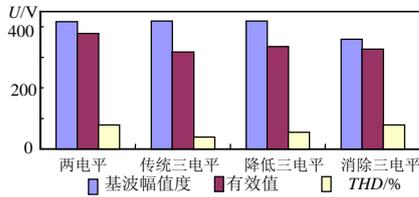


图9 线电压比较

Fig. 9 Comparison of line-to-line voltage

图10给出了不同控制策略对电动机起动性能的影响。图中1,2,3分别代表控制策略为两电平、传统三电平和降低共模电压的三电平SPWM作用下电动机的转速和转矩;图中4代表消除共模电压的三电平SPWM作用下电动机的转速和转矩。可见,不同控制策略对电动机的转速和转矩的影响不同,前3种波形几乎重合,对电动机性能的影响近似相同;消除共模电压的三电平SPWM策略对电动机的转速上升时间的影响最大,延迟近0.1s,且起动过程中电动机转矩降低,则增大了电动机的过渡过程时间,其原因是消除共模电压的三电平技术使变频器输出的差模电压降低幅度最大。

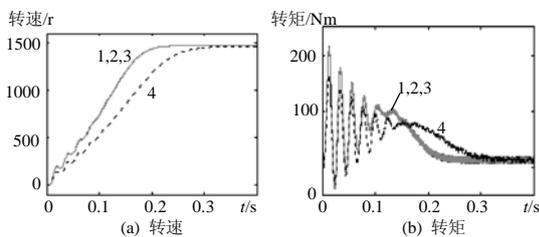


图10 几种SPWM控制方法下电动机起动性能比较

Fig. 10 Motor starting performance comparisons with different SPWM controls

综上,几种SPWM方法中,三电平技术在降低共模电压方面的优势很明显:①三电平技术在低压系统中应用主要就是降低共模电压对变频器驱动感应电动机系统中的负面效应;②尽管消除共模电压的三电平技术抑制共模电压的效果最佳,但由于这种方法对变频器输出的差模电压影响最大,从幅值到总谐波含量THD都不尽如人意,因此在实际应用中,这种方法是不宜采用的;③而降低共模电压的三电平技术综合性能是最佳的,因此这种方法在实际应用中是可行的。

## 4 结论

研究了三电平变频器驱动感应电动机系统中

降低变频器输出共模电压的方法。首先分析了传统的三电平技术,指出三电平变频器也产生共模电压。但其产生的共模电压要比两电平技术产生的共模电压小,即多电平技术有利于降低共模电压的负面效应。并以SPWM技术为例分析了三电平技术中共模电压的产生原因。据这个原因提出了降低共模电压和消除共模电压的方法。利用仿真手段验证了所提方法的有效性,对各种方法进行了比较,其结论是在不影响电动机运行性能的条件下本文所提出的降低共模电压SPWM是比较理想的手段。

## 参考文献

- [1] Noboru A. Damping circuit to suppress motor terminal over-voltage and ringing in PWM inverter-fed AC motor drive systems with long motor leads[J]. IEEE Trans. Ind. Appl. 1999, 35(5): 1014-1020.
- [2] Murai Y, Kubota T, Kawase Y. Leakage current reduction for a high-frequency carrier inverter feeding an induction machine[C]. IEEE Trans. Appl. 1992, 28: 858-863.
- [3] Zhong E, Chen S, Lipo T A. Improvement in EMI performance of inverter-fed motor drives[C]. Proc. IEEE APEC Conf. Rec., 1994: 608-614.
- [4] 姜艳妹, 徐殿国, 陈希有. 一种新颖的用于消除PWM逆变器输出共模电压的有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 125-129.  
Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Chen Xiyou. A novel PWM inverter output active filter for common-mode voltage cancellation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 125-129.
- [5] 姜艳妹, 徐殿国, 陈希有. 一种消除PWM逆变器驱动系统中的电动机端轴电压和轴承电流的前馈有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 134-138.  
Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Chen Xiyou. A novel feed-forward-type active filter to eliminate shaft voltage and bearing current at motor terminal in a PWM inverter drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 134-138.
- [6] 姜艳妹, 徐殿国, 刘宇, 等. PWM驱动系统中感应电动机共模的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 149-155.  
Jiang Yanzhu, Xu Dianguo, Liu Yu et al. Research on induction motor common-mode model in a PWM drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 149-155.
- [7] 姜艳妹, 徐殿国, 刘宇, 等. 一种新颖的逆变器输出无源滤波器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 134-138.  
Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Liu Yu et al. Research on a Novel Inverter Output Passive Filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 134-138.
- [8] Hyeoun-Dong Lee, Seung-Ki Sul. Common-mode voltage reduction method modifying the distribution of zero-voltage vector in PWM converter/inverter system[J]. IEEE Trans. on Industry Applications. 2001, 37(6): 1732-1738.
- [9] 王广柱. 二极管嵌位式多电平逆变器直流侧电容电压不平衡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 111-117.  
Wang Guangzhu. Mechanism of dc bus voltage unbalance in diode-clamped multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 111-117.

收稿日期: 2004-07-15。

作者简介:

姜艳妹(1971-),女,博士,讲师,研究方向为电力电子与电力传动;  
徐殿国(1960-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力电子与电力传动、电机与电器、机电控制及自动化、无损探伤与检测技术等。