

基于反向传播神经网络的 SVM 技术在电压型变流器中的应用研究

李建林, 李玉玲, 李 淳, 张仲超

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

RESEARCH ON CPN-SVM TECHNIQUE APPLIED IN VSC

LI Jian-lin, LI yu-lin, LI chun, ZHANG Zhong-chao

(Electrical Engineering Department, Zhejiang university, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Based on the principle of SVM for three-phase Voltage Source Converter, this paper presents a Counter Propagation Neural Networks SVM implementation on basis of a neural network structure. In order to avoid the sin function, the proposed technique takes advantage of a competitive layer to calculate the duration of the adjacent switching state vectors. This technique reduces hardware and software complexity, and computation time, and improves the accuracy of the positioning of the switching instants. The technique exhibits the following features: a) possibility of higher switching frequencies, b) higher bandwidth of the control loops, c) hardware and software saving, d) reduction of parasitic harmonics in all PWM waveforms. All this had been verified by simulation and experimental results.

KEY WORDS: Power electronics; Counter propagation neural networks (CPN); Space vector modulation (SVM); Voltage source converter (VSC)

摘要: 在分析三相电压型变流器空间矢量调制 (SVM) 技术基本原理的基础上, 提出了一种基于反向传播神经网络结构的 SVM 技术 (CPN-SVM) 的实现方法。该方法采用 CPN 竞争层来计算 SVM 中各个矢量的具体作用时间, 避免了计算正弦函数这一非线性运算, 缩短了计算时间, 采样周期的可进一步缩短。仿真和实验表明: CPN-SVM 除了具备 SVM 的固有优点外, 还有下述几个显著优点: ①大大降低了整个控制系统的软硬件成本, 提高了对开关瞬态位置判断的准确性; ②随着采用周期的缩短, 最大开关频率相应增大, 从而提高了整个系统的传输带宽; ③避免了由于计算误差给 SVM 波形中所带来的附带谐波。

关键词: 电力电子; 反向传播神经网络; 空间矢量调制; 电压型变流器

1 引言

空间矢量调制 (SVM) 以其直流电压利用率高, 开关器件损耗低, 动态响应快、波动小, 易于数字实现的优点倍受国内外广大学者的青睐^[1-3]。就波形发生的角度而言, SVM 的实现较为简单, 且易于理解。然而, 在实际应用中, 由于计算两个矢量作用的时间需要用到正弦函数这一耗费大量时间的非线性运算, 为确保一个采样周期内将结果算出, 不得不限制最小采样周期, 致使这种优秀的调制策略的应有效果降低。为此, 有的学者提出了函数逼近的思想, 采用查表方法来逃避这些非线性运算, 效果却不好: 一是需要外扩 RAM, 增加了成本; 二是采用查表方法来逼近非线性函数无形中会有取舍误差, 存在精度问题。鉴于上述原因, 本文将反向传播神经网络 (CPN) 引入 SVM 中, 提出了基于 CPN 的 SVM 技术。这种技术不仅继承了 SVM 的优点, 又克服了非线性计算所带来的负面影响。文中将 CPN-SVM 技术成功地应用到了电压型变流器中 (Voltage Source Converter, VSC), 获得了优良控制性能。仿真和实验表明: 这种技术既可实现变流器输入端的单位功率因数, 又可实现直流电压的稳定。将 CPN-SVM 稍加改动便可应用到电流型变流器, 以及多电平变流器中, 是一种较 SVM 更好的调制策略。

2 电压型变流器空间矢量调制技术的基本原理

图 1 所示电路为电压型变流器的主电路。上、下桥臂在任意时刻都必须有而且仅有一个开关管导通, 开关函数可定义为^[4-5]

$$\begin{cases} S_m = 1 (S'_m = 0) & \text{上桥臂IGBT导通, 下桥臂IGBT截止} \\ S_m = 0 (S'_m = 1) & \text{上桥臂IGBT截止, 下桥臂IGBT导通} \end{cases}$$
 (m 为 a, b, c) (1)

如图 2 所示, 三相六开关电压型变流器根据开关的不同组合划分为 8 个空间矢量, 其中 6 个为非零矢量 $v_1 \sim v_6$, 两个零矢量 v_7 、 v_8 。利用这 8 个基本矢量可以合成任意角度和模长的参考矢量 V^* 。从图 2 可以看出, 6 个非零矢量将整个平面分成 6 个扇区。以第 I 扇区为例, 依平行四边形法则^[6-8], 有

$$T_4 V_4 + T_6 V_6 = T_s V^* \quad (2)$$

由式(2)可以解得

$$\begin{cases} T_4 = \frac{\sqrt{3} M T_s \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)}{U_d} \\ T_6 = \frac{\sqrt{3} M T_s \sin \theta}{U_d} \\ T_0 = T_s - T_4 - T_6 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{3}$; T_s 为采样周期; T_4 、 T_6 、 T_0 分别为矢量 V_4 、 V_6 、 V_0 的导通时间。

式(2)中, T_4 、 T_6 不足时, 插入零矢量补足, 一般有

$$\begin{cases} T_{00} = k T_0 \\ T_{07} = (1 - k) T_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $0 \leq k \leq 1$; T_{00} 、 T_{07} 分别代表零矢量 V_0 、 V_7 的作用时间。

其它扇区的调制算法完全相同。定义幅度调制比 m_r 为

$$m_r = \frac{M}{U_d / \sqrt{3}} \quad (5)$$

采用上述方法直接应用于电压型变流器的 SVM 计算, 则需要首先根据开关矢量的作用判断扇区, 然后计算开关矢量的作用时间, 比较繁琐^[5], 为此引入了 CPN 网络来解决这一问题。

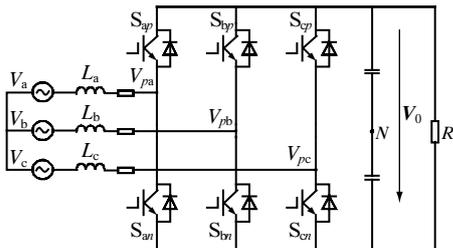


图 1 电压型变流器的主电路拓扑
Fig.1 Topology of three-phase VSC

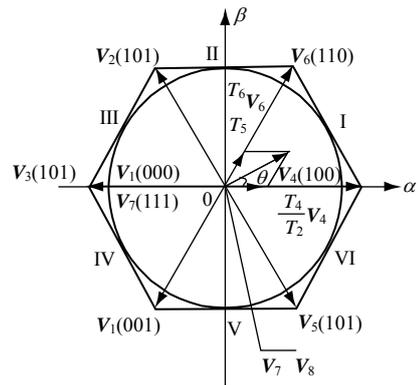


图 2 电压空间基本矢量图

Fig.2 Diagram of fundamental voltage space vector

3 CPN-SVM 的实现

CPN 网络由一个全互连的神经元阵列组成^[9-10]。当外部输入模式出现时, 网络的每个神经元都同时工作, 网络采用“赢者通吃”的竞争学习机制, 完成对复杂模式的分类过程, 并在回复 (Recalling) 模式时, 按一定权来分配模式间的关系。对于 CPN-SVM, 首先判定 V_{ref} 处于确定的 6 个分类模式区域中的哪一个, 就可知 V_K 和 V_{K+1} 。如图 2 所示, CPN-SVM 与传统的 SVM 相一致, 也是利用非零矢量将整个平面分为 6 个扇区。因而, 此处的分类模式数为 6, 是一个确定的量。为此, 可省去传统神经网络繁琐的“学习、训练”过程, 这一点也正是神经网络引入 CPN-SVM 的优势所在。

如图 3 所示, 在一个神经网络的输入层加上输入矢量 U , 则 6 个已确定竞争层的节点。通过竞争的胜者, 即为 SVPWM 中最靠近 V_{ref} 的主矢量 V_K 。这样, 只需求出最大与次大的, 即可得出主、辅矢量 V_K 和 V_{K+1} 。这是借鉴 Kohonen 神经网络所带来的有益提示。由式(1)、(2)可得

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ n_4 \\ n_5 \\ n_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -1 \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aref} \\ V_{bref} \\ V_{cref} \end{bmatrix} \quad (6)$$

竞争层节点 n_i 是参考电压矢量 V_{aref} 、 V_{bref} 、 V_{cref} 的简单的线性组合, 权矩阵的后 3 行系数符号恰好与上 3 行系数的符号相反, 可进一步减少计算量。

设 n_i 和 n_{i+1} 为竞争层的胜者。则有：
$$\begin{bmatrix} n_i \\ n_{i+1} \end{bmatrix} =$$

$$\|V_{ref}\| \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(60^\circ - \theta) \end{bmatrix} = \|V_{ref}\| \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 1 \\ 1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(60^\circ - \theta) \end{bmatrix}$$

即

$$\frac{2T}{3E} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_{i+1} \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\|V_{ref}\|}{E} \begin{bmatrix} \sin(60^\circ - \theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} T \quad (7)$$

比较式(3)即可得

$$\begin{bmatrix} t_i \\ t_{i+1} \end{bmatrix} = \frac{2T}{3E} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_i \\ n_{i+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

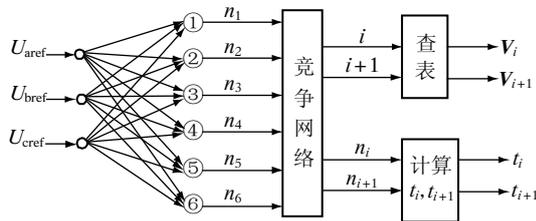


图 3 反向传播神经网络

SVM (CPN-SVM) 在 VSC 的实现

Fig.3 Proposed CPN-SVM implementation for VSC

4 CPN-SVM 与传统 SVM 的对比分析

比较图 4 和图 5 可以看出：传统的 SVM 实现步骤为：①将输入变量 U_{aref} 、 U_{bref} 、 U_{cref} 进行 park 变换得到 U_α 、 U_β ；②依据 park 变换后的 U_α 、 U_β ，应用 $U_{ref} = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2}$ 来求出 U_{ref} ；③按 $\theta = \arctan(U_\alpha / U_\beta)$ 求出所需 θ （或者按 TI 公司提供的简化算法： $A = U_\beta$ ； $B = \frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{1}{2}U_\beta$ ；

$$C = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{1}{2}U_\beta$$

$N = A + 2B + 4C$ ， N 即为 U_{ref} 所在扇区)；④依据 θ 所在位置来判断扇区；⑤依据下述 3 个表达式： $t_i = m * T \sin(60 - \theta)$ ；

$$t_{i+1} = m * T \sin(\theta)；t_0 = T - t_i - t_{i+1}$$

来求出相应两个有效矢量和零矢量所作用的时间。而 CPN-SVM 整个计算过程具体实施步骤如下：①根据式(6)计算 n_1 、 n_2 、…… n_6 ；②根据竞争网络选择最大的 n_i 和次大的 n_{i+1} ，并记录它们的系数 i 和 $i+1$ ；③依据式(8)计算开关矢量的作用时间 t_i 和 t_{i+1} ；④根据系数 i 、 $i+1$ 查表选择对应的开关矢量，即可确定参考矢量所在的扇区。相对于传统的 SVM 而言，CPN-SVM 所需步骤大大减化，不仅不需要进行 park 变换、而且避免了判断扇区所需的反正切函数（或者 TI 简化算法中的若干次乘法运算），计算作用时间的所

需的正弦函数。这两个非线性函数的避免，其优势显而易见：大大减少了所需的计算时间，从而最小采样周期可以缩短，这就有效拓宽了整个控制的传输带宽；减少了逼近非线性函数存在的取舍误差给 SVM 所带来的寄生谐波。所引入的 CPN 网络，因分类模式确定而避免了繁琐的“学习、训练”过程，而且实现过程中只是涉及到一些简单的加法和乘法运算，这就为 SVM 技术的进一步实用化奠定了基础。

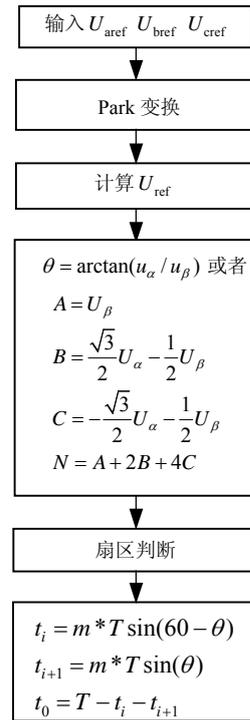


图 4 传统 SVM 实现流程图

Fig.4 Conventional SVM calculation flow diagram

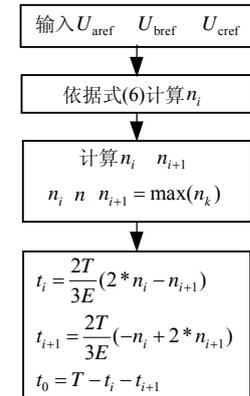


图 5 CPN-SVM 实现流程图

Fig.5 CPN-SVM calculation flow diagram

5 仿真和实验验证

通过 MATLAB6.0 的动态仿真工具 Simulink 建立起整个控制系统的仿真模型，仿真参数设置为：

三相输入相电压峰值 $U_m=150\text{V}$ ；角频率 $\omega=100\pi\text{rad/s}$ ；给定直流电压值 $U_o=300\text{V}$ ；进线电感 $L=5\text{mH}$ ；输出端电容 $C=4700\mu\text{F}$ 。软件仿真算法采用 ode23tb。图 6(a)表示直流端电压的变化曲线，图 6(b)表示交流端 A 相电压和电流的变化曲线。图 7 是相应的实验波形，图 8 为 A 相电流频谱图，其中 n 为谐波次数， m 为各次谐波幅值与基波幅值之比。其仿真结果与实验结果基本一致，从而验证了本系统能实现高功率因数。

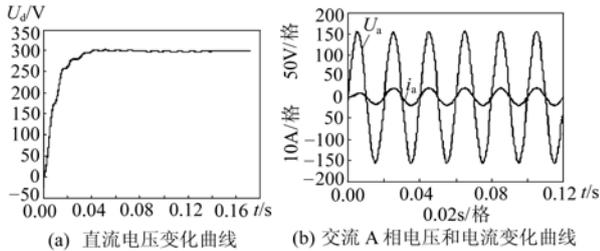


图 6 基于 CPN-SVM 的电压型变流器的仿真波形
Fig.6 Simulation wave for VSC

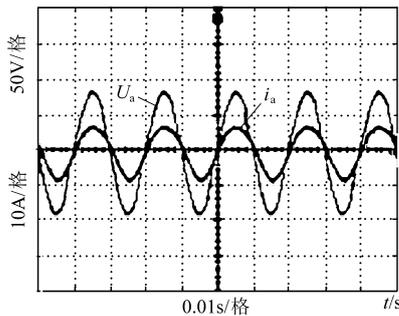


图 7 基于 CPN-SVM 的电压型变流器
A 相电压电流的实验波形

Fig.7 Experimental waveform and frequency
for VSC based on CPN-SVM

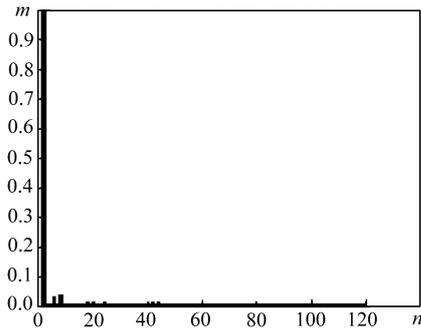


图 8 A 相电流频谱图

Fig.8 Frequency schematic of A phase current

6 结论

本文提出的基于神经网络的电压型变流器 SVM 技术 (CPN-SVM) 的实现是一种非常简单易行的方法，该方法避免了计算正弦、反正切等非线性运算，缩短了计算时间。基于神经网络 SVM 调制技术即可实现电压型变流器单位功率因数，能将输出直流电压

稳定在一个设定的直流电压值附近，且保持其小纹波特性，是一种应用前景看好的调制方法。

参考文献

- [1] Zargari N R, Joos G. Performance investigation of a current-controlled voltage-regulated PWM rectifier in rotating and stationary frame[C]. Proc. IEEE Annu. Conf. Industrial Electronics Society, 1993: 1193-1197.
- [2] Rusong Wu, Shashi B, Dewan *et al.* A PWM AC-to-DC converter with fixed switching frequency[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1990, 26(5): 880-885.
- [3] 李志勇, 朱建林, 易灵芝, 等. 空间矢量调制的矩阵式变流器仿真模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 80-84.
Li Zhiyong, Zhu Jianlin, Yi Lingzhi *et al.* Simulation research of space-vector modulated matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 80-84.
- [4] 毛鸿, 吴兆麟. 基于三相 PWM 整流器的无死区空间矢量调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2001, (11): 100-104.
Mao Hong, Wu Zhaolin. The non-dead-time space-vector-modulation strategy based on three-phase PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, (11): 100-104.
- [5] 张纯江, 刘彦民, 郭伟扬, 等. 软开关 AC/DC 变流器中 SVPWM 波形的优化选择[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 35-38.
Zhang Chunjiang, Liu Yanmin, Wu Weiyang *et al.* Optimal choice of SVPWM waves for soft-switched AC/DC rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 35-38.
- [6] Chern-Lin Chen, Che-Ming Lee, Rong-Jie Tu *et al.* A novel simplified space vector modulated control scheme for three-phase switch-mode rectifier[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1999, 46(3): 512-515.
- [7] 王立乔, 王长永, 张仲超. 组合变流器相移 SVM 技术的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18): 36-41.
Wang Liqiao, Wang Changyong, Zhang Zhongchao. Study of the multi-modular phase-shifted SVM converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 36-41.
- [8] Liqiao Wang, Yushui Huang, Zhongchao Zhang *et al.* Cascade multi-level converters with sample-time-staggered space vector modulation[C]. IEEE Eighteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, in US Florida, APEC'03, 2003, 268-275.
- [9] Vukosavic V S, Stojic M. Reduction of parasitic spectral components of digital space vector modulation by real-time numerical methods[J]. IEEE Trans. Power Fig. Electron. 1995, 10(1): 94-102.
- [10] Blumel R. Application of kohonen's self-organizing artificial neural networks to PWM inverter drives[C]. In Conf. Rec. 1994. IEEE-IECON Ann. Mtg. 1994: 1242-1246.

收稿日期: 2004-09-04。

作者简介:

李建林 (1976-), 男, 博士生, 主要从事载波相移 SPWM 技术、有源电力滤波器等方面的研究;

李玉玲 (1973-), 女, 博士研究生, 主要从事功率因数校正方面的研究;

李淳 (1978-), 男, 硕士研究生, 从事有源电力滤波器, 开关电源等方面的研究;

张仲超 (1942-), 男, 教授、博士生导师, 从事电力电子技术和应用方面研究。