

两种混合多电平变换器拓扑结构控制策略的分析

江友华,曹以龙,龚幼民

(上海大学机电工程与自动化学院自动化系,上海 200072)

摘要: 提出了一种以是否共享中间直流电压源为依据的新的多电平拓扑结构分类,并给出了两种相应的拓扑结构。这两种拓扑结构结合了 GTO 耐压值高和 IGBT 开关频率快的优点,并对它们分别采用工频调制和 PWM 调制策略,既可以减小系统开关损耗,降低 EMI,又可以提高电压等级。其中不同电压比的混合拓扑结构还可以在相同直流电压源的情况下,增加输出电压电平数量。最后对这两种拓扑结构和控制策略进行了比较和分析,同时给出了一些在实际设计中应该注意的问题。

关键词: 混合多电平拓扑; 直流电压源; 级联型结构; 电压比率

中图分类号: TM921 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)20-0017-04

0 引言

变频调速技术的飞速发展,为变频器性能的提高提供了技术保障,而环保和节能的客观需要,又为变频器在生产和生活的各个领域的应用提供了发展空间。随着国民经济的发展,小容量变频器越来越不能满足现代化生产和生活的需要。因此,近年来高压大容量的变频器越来越受到重视。可是到目前为止,高压变频器还没有像低压变频器那样近乎统一的拓扑结构,所以其分类也不尽相同^[1,2]。对于大功率电力电子装置拓扑结构的分类方式一般是以电路拓扑中是否使用了变压器为标准的,这种标准主要是从装置本身的效率、体积和性能价格比等方面考虑的;另一种分类方式是着眼于单个器件的电压或电流承受能力不能适应高压大容量要求这一问题,寻着这种思路可以把大功率电力电子变流器装置的拓扑结构分为两类:1)以器件串、并联为基础的桥臂扩展型结构;2)以变流单元电路串、并联为基础的多单元变流器结构。这种分类方式从电路构成的角度揭示了各种拓扑结构的内在联系。文中,提出一种新的分类方式,其出发点是根据直流电压源的个数来划分的。按照这种分类方式,也可以分为两类:1)共享单个直流电压源的拓扑结构;2)需要多个独立电压源的拓扑结构。这种分类是根据不同多电平的优缺点来划分的。按照这种分类方式,多管串联的两电平变换电路、二极管钳位和飞电容钳位型多电平拓扑属于共享单个直流电压源的拓扑结构;标准级联型多电平变流器属于需要多个独立直流电压源的拓扑结构。

文中依据新的分类方式给出了两种混合级联型

拓扑结构,这种拓扑结构结合了不同功率单元的优点,通过采用不同的控制策略,其性能可比传统的级联型多电平得到改善,最后通过仿真加以验证,并给出一些实际中应该注意的问题。

1 混合多电平控制策略的分析

1) 共享单个直流电压源的混合级联型拓扑结构

对于两个串行连接的多重化变频器拓扑结构,可以有下面的几种构成。

两个都是 GTO 变频器,都采用方波调制,开关损耗小,系统容量可以达到很大,可是输出波形性能很差。两个都是 IGBT 变频器,采用载波相移控制策略,输出波形性能很好,可是开关损耗较大,而且系统容量比较小。结合前面两者优点,采用混合拓扑结构,一个为 GTO 变频器,另一个是 IGBT 变频器,容量可以做到比第二种方式大,波形质量又可以比第一种好。既能满足容量要求,开关损耗也小,又能满足实际应用中波形质量的要求^[3]。

图 1 就是采取上面第三种方式的混合拓扑结构,它是由一个 GTO 变频器和一个中心点钳位(NPC) IGBT 三电平变频器构成,两个变频器共用一个直流电压源,通过变压器(传输比 1:1)串行连接起来。GTO 变频器工作在方波模式,其开关频率和参考输出频率一致,因而开关损耗小。相反,IGBT 变频器以较高的开关频率工作在 PWM 模式下,两者结合起来,输出电平可以达到 9 个,因而输出波形非常接近正弦波。系统的输出电压大部分由 GTO 变频器产生,大约为 63.7%,IGBT 变频器的功能则是产生剩余的输出电压,同时还对 GTO 变频器产生的谐波

进行补偿。因此这种拓扑结构具有以下特点：

输出电压由 GTO 变频器和中心点钳位 (NPC) IGBT 三电平变频器通过变压器合成,因此输出电压能产生两倍于单个 PWM 变频器的输出电压,电压级别可以得到提高;

输出电流谐波含量少;

GTO 变频器的开关损耗很小。

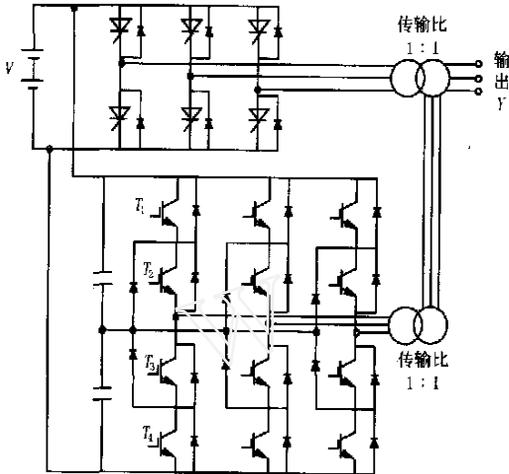


图 1 串行连接混合逆变系统

Fig. 1 Series-connected hybrid inverter system

现在对输出电压分配进行分析。假设相电压 V^* 是正弦波,如图 2(a) 所示。

$$V^* = V_1 \sin t = mV \sin t, \quad m = V_1/V \quad (1)$$

式中 m 为调制比,其中 $0 < m < 1$ 。GTO 变频器产生图 2(b) 所示的方波,即

$$\begin{cases} V_{GTO} = V/2 & V^* > 0; \\ V_{GTO} = -V/2 & V^* < 0; \end{cases}$$

因而 IGBT 变频器产生的电压如图 2(c) 所示,且可以用下式来表示

$$V_{IGBT} = V^* - V_{GTO} \quad (2)$$

由于 IGBT 变频器是基于 PWM 脉宽调制技术,所以 IGBT 的导通和截止也是通过参考波和三角波相比较来控制的。但它不是和一个三角波进行比较,而是和两个三角波进行比较,一个正三角波 T_{r11} ,一个负三角波 T_{r12} ,如图 3 所示。所以 IGBT 变频器的输出按照下列规律来控制:当参考波 $V_{IGBT} > T_{r11}$ 时,图 1 中上面两个开关管 $T_1、T_2$ 开通,电压输出为 $V/2$;当参考波 $T_{r12} < V_{IGBT} < T_{r11}$ 时,图 1 中中间两个开关管 $T_2、T_3$ 开通,电压输出为 0;当参考波 $V_{IGBT} < T_{r12}$ 时,图 1 中下面两个开关管 $T_3、T_4$ 开通,输出电压为 $-V/2$ 。即关系如下:

$$\begin{cases} V_{IGBT} = V/2 & \text{当 } V_{IGBT} > T_{r11} \text{ 时} \\ V_{IGBT} = 0 & \\ V_{IGBT} = -V/2 & \text{当 } V_{IGBT} < T_{r12} \text{ 时} \end{cases}$$

按照上述方法对图 1 所示拓扑结构以及图 2 所示参考电压波形分配进行仿真,可以得到相电压输出波形如图 4 所示,其中输出频率为 50 Hz,二极管钳位三电平电路载波频率为 4 kHz,调制比 $m = 1$ 。从仿真图可以看出,输出波形有 9 个电平,因此输出波形非常接近正弦波。其中 V_{GTO} 输出电压(图 2(b) 所示方波电压的基波含量)可用式 (3) 来表示:

$$V_{GTO} = \frac{2}{\pi} V \sin t = 0.637 V \sin t \quad (3)$$

根据公式 (1)、(2)、(3) 可以得到 V_{IGBT} 输出电压可用式 (4) 来表示:

$$V_{IGBT} = (m - 0.637) V \sin t \quad (4)$$

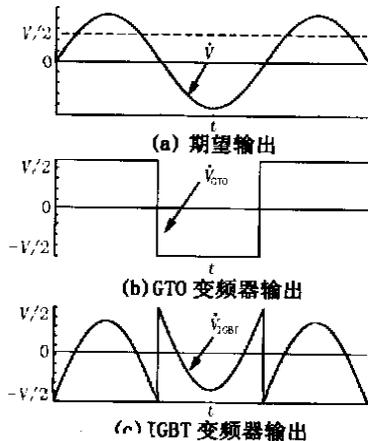


图 2 参考电压波形

Fig. 2 Reference voltage waveforms

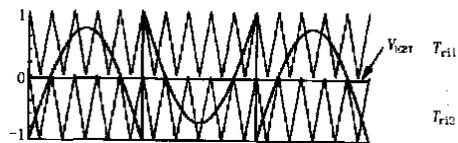


图 3 NPC 变频器 PWM 方法

Fig. 3 PWM method for NPC inverter



图 4 输出电压波形仿真图

Fig. 4 Simulated output voltage waveforms of GTO inverter (supper), IGBT inverter (middle), resultant (lower)

2) 多个独立直流电压源的混合级联型拓扑结构^[4,5]

这种多电平拓扑结构有一个特点:即电路的每个基本单元都需要用一个独立的直流电源来实现钳位功能,虽然使用单独的直流电源可以使电路的各个单元彼此隔离,从而解决单元级联时的动态均压和电压钳位问题,但是随着输出波形电平数的增加,所需要的直流电源数也将增加,因此这既是级联型拓扑结构的一个优点,也是它的一个缺点。为此本文给出一种混合拓扑优化控制策略,在相同直流电压源的情况下,可以增加输出电压电平数量,从而提高输出波形质量,减少谐波和开关损耗,降低电磁干扰(EMD)等。

由相关文献[6,7]可知,当独立的直流电源的电压值相等,并且取 V 时,由 k 个单相全桥逆变单元组成的单相级联型多电平电路输出的电平数为 $2k+1$ 。若将级联多电平变换器中各独立的直流电源的电压值分别取 $V, 2V, 4V, 2^k V$,则其输出的电平数大幅度地增加到 $2^k - 1$,这就是改进的级联多电平变换器的思想。

图5为采用改进级联多电平结构的GTO和IGBT混合型逆变电路,该逆变器的直流侧总电压为4.5 kV,由GTO组成的高压单元承担3 kV,由IGBT构成低电压单元承担1.5 kV。采用合适的控制策略,可以在输出合成由 $-4.5 \text{ kV}, -3 \text{ kV}, -1.5 \text{ kV}, 0, 1.5 \text{ kV}, 3 \text{ kV}, 4.5 \text{ kV}$ 等七电平构成的阶梯波,如表1所示。和电压相等的普通级联多电平电路相比,输出电压的电平数由5个增加到7个。将波形合成策略和脉冲宽度调制PWM策略相结合,可以得到一种非常适合于该种混合型级联多电平逆变器的控制策略:较高电压的GTO逆变单元以输出电压的基波频率为切换频率,而较低电压的IGBT逆变单元则在较高的频率下进行脉冲宽度调制,以此来改善输出波形,GTO和IGBT在电路中的作用有所不同,GTO主要用来承担电压,输出主要功率,而IGBT用来改善输出波形和输出剩余功率。图6为混合逆变电路仿真输出波形,其中图6(a)为GTO输出波形,开关频率为基波频率,图6(b)为IGBT输出波形,载波频率为4 kHz。级联型多电平变换器中各独立的直流电源的电压值还可以分别取 $V, 3V, 9V, 3^k V$,这里的 V 表示变换器中间直流电压的量化值。则其输出的电平数大幅度地增加到 3^k 。但由于电压以 $2^k, 3^k$ 倍数增加,而器件的耐压有限,所以改进型级联多电平电路的串联级数不能无限增加,实际系统的级联数

目多不会超过3。因此这种拓扑结构其电压比通常要满足下面条件^[8]:

$$U_{d1} \quad U_{d2} \quad \dots \quad U_{dk} \quad U_{dj} \quad 2 \left(\sum_{i=1}^{j-1} U_{di} \right) + 1 \quad (5)$$

式中: U_{dj} 表示独立直流电源电压值, k 表示功率单元级联个数。

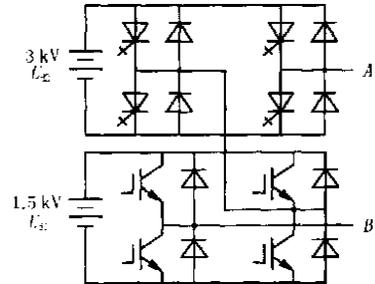


图5 改进型级联逆变器主电路

Fig. 5 Main circuit of the improved cascaded inverter

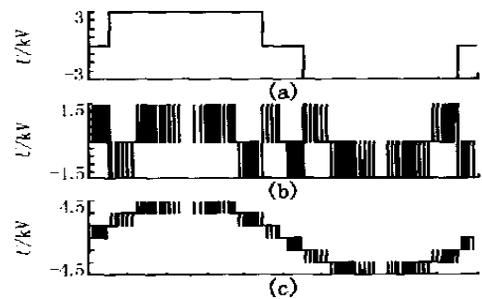


图6 改进型级联逆变器输出波形

Fig. 6 Output waveforms of the improved cascaded inverter

表1 改进的级联多电平变流器

各输出电平组合情况($V_{dc} = 2V_{dc1} = 2E$)

Tab. 1 Output levels combination of the improved cascaded inverter

V_o	GTO 单元的输出电压	IGBT 单元的输出电压
$3E$	$2E$	E
$2E$	$2E$	0
E	0	E
0	0	$-E$
$-E$	0	0
$-2E$	$-2E$	E
$-3E$	$-2E$	0
	$-2E$	$-E$

2 两种拓扑结构的比较和结论

级联型拓扑是一种较为新颖的多电平变换器结构。它采用若干个低压变流单元直接级联的方式实现高压输出,由这种拓扑结构组成的电压源型变频器具有对电网谐波污染小、输入功率因数高、不必采用输入谐波滤波器和功率因数补偿装置,输出波形

好的优点,不存在由谐波引起的电动机附加发热和转矩脉动、噪声、输出 dv/dt 、共模电压等问题,可以使用普通的异步电动机。

图 1 拓扑结构的优点是可以共享直流电压源。缺点是在输出端需要变压器进行隔离和耦合。另外从式(3)可以看出,一旦电压 V 固定,则 GTO 变频器不具备电压控制能力,因此输出电压只能通过调节调制度 m 由 IGBT 变频器来进行控制。图 7 就是表明 GTO 变频器输出电压、IGBT 输出电压及系统输出电压同调制度 m 之间的关系。从图中可以看出,当 $m = 0.637$ 时,IGBT 变频器提供负电压(注:这里所谓的负电压是相对于系统而言,即当调制度 $m = 0.637$ 时,IGBT 变频器生成的电压不是和 GTO 生成的电压进行叠加而加强系统的输出电压,而是产生一个电压去抵消 GTO 生成的电压,从而维持系统输出电压按照调制度 m 变化);而当 $m = 1.0$ 时,又是过调制,所以在实际中,应该避免这两种情况发生。

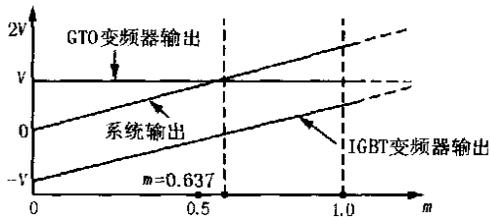


图 7 输出电压控制特性

Fig. 7 Characteristics of output voltage control

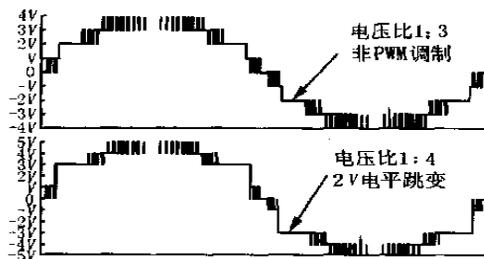


图 8 不同电压比输出电压波形

Fig. 8 Output waveforms of different voltages ratio

图 5 这种改进型混合级联型拓扑结构的优点是在输出端可以直接高压输出,不需要变压器耦合,这种拓扑结构的另一个优点是和等电压比的级联型拓扑相比较,在相同直流电压源的情况下,可以增加输出电压电平数量,因此可以提高波形质量。但是这种改进型拓扑结构的电压比也不是可以为任意值,一旦超越了式(4)的限制条件,输出波形性能就变差,引来一系列其它问题,缺点是需要多个独立直流电压源。图 8 为电压比分别为 1:3 和 1:4 的仿真输出波形,由仿真波形可以看出,电压比为 1:3 时,输

出电压在 2V 上没有进行 PWM 调制;当电压比为 1:4 时,会发生 2V 电压的跳变,由此引起高的 dv/dt ,电磁干扰(EMI)也随着增加,所以在实际中电压比不超过 3,而且级联级数也以不超过 3 个为宜。

参考文献:

- [1] 徐甫荣(XU Fu-rong). 中高压变频器主电路拓扑结构的分析和比较(Analysis and Comparison about Main Circuit Topology of Medium-voltage Inverter) [J]. 电源技术应用(Power Supply Technologies and Applications), 2002, 5(9): 426-433.
- [2] 费万民,姚文熙,吕征宇,等(FEI Warrmin, YAO Wen-xi, LüZheng-yu, et al). 中高压变频调速技术综述(Development of Medium-high Voltage Variable Frequency Motor Drive Technology) [J]. 电力电子技术(Power Electronics), 2002, 36(2): 74-78.
- [3] Kitano M, Fukuda S. A PWM Method for Three Phase Series-connected Hybrid Inverter System[J]. IEEE of Japan IAS Conference, 2000, 2: 747-750.
- [4] Corzine KA, Sudhoff SD. High State Count Power Converters: An Alternate Direction in Power Electronics Technology [J]. SAE Trans J. Aerosp, 1998, 124-135.
- [5] Manjrekar M D, Steimer P K, Lipo TA. Hybrid Multi-level Power Conversion System: A Competitive Solution for High power Applications[J]. IEEE Trans and Applicat, 2000, 36: 834-841.
- [6] 齐悦,杨耕,龚日轩(QI Yue, YANG Geng, DOU Yue-xuan). 基于多电平变换逆变电路的拓扑分析(The Topology Analysis of the Multilevel Inverter) [J]. 电机与控制学报(Electric Machines and Control), 2002, 6(1): 74-79.
- [7] Lai Y S, Shyu F S. (New Topology for Hybrid Multilevel Inverter) [A]. Power Electronics, Machines and Drives, 2002, 211-216.
- [8] Song-Manguelle J, Rufer A, Lausanne. Asymmetrical Multi-level Inverter for Large Induction Machine Drives[J]. Power Drives and Power Electronics, 2001: 101-107.

收稿日期: 2004-02-04; 修回日期: 2004-03-20

作者简介:

江友华(1974-),男,博士研究生,研究方向为电力电子技术与电力传动; E-mail: jyhua0306@sina.com

曹以龙(1965-),男,副教授,博士,研究方向为电力电子技术与电力传动;

龚幼民(1938-),男,教授,博导,研究方向为电力电子技术与电力传动。

上网电价预测中运用修正神经元输出函数 对 BP 模型动态修正的探索

张喜铭¹, 姚建刚¹, 李立颖¹, 张跃辉², 苏竹新²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南湖大华龙电气与信息技术有限公司, 湖南 长沙 410082)

摘要: 阐述了人工神经网络模型的基本原理, 研究分析了 BP 神经网络模型非线性特性差和对实际情况反应“迟钝”等缺陷, 提出了通过修正神经元输出函数对 BP 神经网络模型进行动态修正的优化方案, 从而提高了 BP 神经网络模型的收敛速度。在此基础上, 将修正后的 BP 神经网络模型引入到上网电价的预测中。模拟运行结果表明, 修正后的 BP 神经网络模型可以更好地适应发电厂报价的复杂环境。

关键词: 上网电价; 人工神经网络; BP 模型; 神经元输出函数

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)20-0021-04

0 引言

人工神经网络模拟人的大脑活动, 具有极强的非线性逼近、大规模并行处理、自训练学习、自组织和容错能力等优点, 将神经网络技术应用于电力交易的上网电价预测中, 可以快速地得到上网电价, 为各发电厂的竞价决策提供依据。

1 人工神经网络模型概述

人工神经网络是由大量简单的基本元件——神经元相互联结, 模拟人的大脑神经处理信息的方式, 进行信息并行处理和非线性转换的复杂网络系统。人工神经网络处理信息是通过信息样本对神经网络的训练, 使其具有人的大脑的记忆、辨识能力, 以完成各种信息处理功能。人工神经网络具有良好的自学习、自适应、联想记忆、并行处理和非线性转换的能力, 在样本缺损和参数漂移的情况下, 仍能保证稳定的输出。这些优点使其能适应电力交易中上网电价预测的复杂环境。

按照网络的拓扑结构和运行方式, 神经网络模型可分为前馈多层式网络模型、反馈递归式网络模型、随机型网络模型等。目前在模式识别中应用较广且成熟的模型是反向传递(BP)网, 它是一种反向传递并修正误差的多层映射网, 在参数适当时, 能收敛到较小的均方误差, 其结构模型如图 1 所示。

1.1 BP 神经网络模型基本原理

BP 网络模型处理信息的基本原理是: 输入信号 X_i , 通过中间节点(隐含层), 作用于输出节点, 经过非线性变换, 产生输出信号 Y_k 。网络训练的每个样本包括输入向量 X_i 和期望输出量 y_k , 网络输出值 Y_k 与期望输出值 y_k 之间的偏差, 通过调整输入节点与隐含层节点的联接强度 w_{ij} , 隐含层节点与输出节点之间的联接强度 t_{jk} 以及隐含层节点的阈值 θ_j 和输出层节点的阈值 r_k , 使误差沿梯度方向下降。经过反复学习训练, 确定与最小误差相对应的网络参数(权值和阈值), 训练即告停止。此时经过训练的神经网络即能对类似样本的输入信息, 自行处理输出误差最小的经过非线性转换的信息^[3]。

Analysis of control strategy for two hybrid multilevel converters with topology structure

JIANG You-hua, CAO Yi-long, GONG You-min

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A new classifiable method of multilevel topology, which based on whether or not sharing the DC voltage sources is given in this paper. Two relevant hybrid series-connected multilevel topologies are introduced. The topologies combining advantage of GTO and IGBT, can not only reduce switching losses and EMI, but also improve output waveforms quality. Especially, the topology which has different voltage ratios can synthesize a large number of voltage levels with the same number of series-connected inverters and, consequently, reduce the THD of the output voltage. Finally, different topologies and strategies are compared and analyzed, meanwhile some points in the application are discussed.

Key words: hybrid multilevel topology; DC voltage source; series-connected structure; voltage ratio