

DOI:10.7652/xjtuxb201408019

应用目标规划理论的电力电子模块化变流器设计

谢桢¹, 肖飞¹, 范学鑫¹, 吕昊², 王瑞田¹

(1. 海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 430033, 武汉; 2. 海军装备研究院, 100161, 北京)

摘要: 基于电力电子模块化组件(PEBB)设计电能变换装置存在最优设计的问题, 以一种大容量中压变流器设计为例, 提出了基于目标规划理论的PEBB设计方法, 并建立了变流器的最优模块化设计数学模型。该设计方法以现状分析为基础, 以目标体现为导向, 然后针对不同目标建立不同的目标表达式和相关约束, 按照优先级顺序, 最终可以得到与目标实现密切相关的最优模块化数学模型。针对模型具有的决策变量整数有界和非线性特点, 通过搜索法和穷举法相结合的方式对模型求解, 得到了PEBB的主电路形式和参数, 并根据模型求解结果设计了变流器样机, 进行了试验。试验结果显示, 变流器额定工况稳态输出纹波小于3%, 突然加载电压瞬态跌落小于10%, 这验证了变流器动、静态输出特性较好, 功能得到实现。基于目标规划理论的PEBB设计方法可以应用到其他需要模块化设计的电能变换装置研发中。

关键词: 电力电子模块化组件; 目标规划理论; 大容量; 变流器

中图分类号: TM46 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)08-0109-07

Goal Programming Theory-Based Power Electronic Building Block Design for Converter

XIE Zhen¹, XIAO Fei¹, FAN Xuexin¹, LÜ Hao², WANG Ruitian¹

(1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

Abstract: Taking high capacity middle-voltage converter as an example, a goal programming theory-based PEBB (power electronic building block) design scheme is proposed and a mathematical model for optimal module design is established. This goal oriented scheme essentially obeys the situation analysis. The goal expression and the related constraints can be described with different target, and then the optimal module model associated with the goals is determined. The main circuit and the PEBB parameters are confirmed by solving the model with limited integer variables and nonlinear components by searching and exhaustion methods. The corresponding converter is constructed and experiments show that the steady output disturbance gets less than 3% and the transient voltage drop less than 10%. The goal programming theory-based PEBB design scheme can be applied to the other developed converters with module designing requirements.

Keywords: power electronic building block; goal programming theory; high capacity; converter

随着电力电子技术的发展, 大量电力电子电能变换装置运用在电力行业的各个领域, 如交流传动、柔性输电、新能源接入等, 并出现了复杂化、高度耦合等特点^[1]。如何设计具有复杂功能的电能变换装

收稿日期: 2013-11-01。 作者简介: 谢桢(1985—), 男, 博士, 助理研究员。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB215103); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NECT-11-0871)。

网络出版时间: 2014-04-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140416.1746.004.html>

置,且具有较好的经济性、较高的可靠性等指标,是设计者面临的难题。

针对该问题,提出一种构建电力电子电能变换装置的新型设计方法,即电力电子模块化组件(PEBB)技术,以解决电能变换装置的设计问题^[2-6]。自20世纪90年代起,美国海军就致力于研究电力电子电能变换装置的模块化技术,并于2000年在美国电气电子工程师学会(IEEE)的发起下成了专门工作组,启动了PEBB工程,开展了诸多PEBB的研究工作^[7]。目前,电力电子模块化组件技术已取得较大发展,文献[8]介绍和总结了各种功率等级的具有可实现性的PEBB技术。从拓扑结构上来看,两电平半桥结构PEBB的研究文献较多^[9-10],多电平PEBB的研究集中在新型拓扑和应用方面^[11-13]。

由于不同的电力电子电能变换装置可以有不同的PEBB拓扑可以选择,这便存在一个问题:如何选择PEBB的拓扑结构、容量和个数来构成具备特定功能要求的电能变换装置,同时满足经济性、可靠性、体积质量等其他要求?这个问题其实就是设计者如何正确地做出决策,属于目标规划问题,数学上属于运筹学的范畴,而科学化的决策和设计是电力电子模块化组件技术得以工程化实现的必经之路。

本文首先系统地对现有各种PEBB的结构形式进行了总结,然后以大容量中压直流变流器为对象,基于目标规划相关理论,从电路拓扑、功率器件选型和数量、无源元件数量、设备可靠性、冗余程度、整体体积质量和成本几个方面,建立了变流器最优模块化设计数学模型,并进行了求解,同时通过试验验证了其设计的可行性和正确性。

1 PEBB 概念

PEBB将一部分控制器、功率单元、保护、采样和驱动电路等集成到一个模块中,如图1所示^[2]。通过数据接口,若干PEBB可组成一个电能变换装置,用户可以通过软件实现PEBB模块之间的相互协调工作,使装置功能得以灵活实现。基于拓扑结构可以总结主要的PEBB类型有半桥结构、H桥结构、三相全桥结构等,不同结构下又可以细分为两电平拓扑、三电平拓扑和多电平拓扑等^[8]。

相对于传统的设计方法,基于PEBB设计电能变换装置具有以下优势:①即插即用,即PEBB能够在线接入电能转换装置,并自动调节工作参数,使其自动与系统合为一体运行;②模块化,系统中每个PEBB都是相对独立的,即系统为开放结构,扩展性

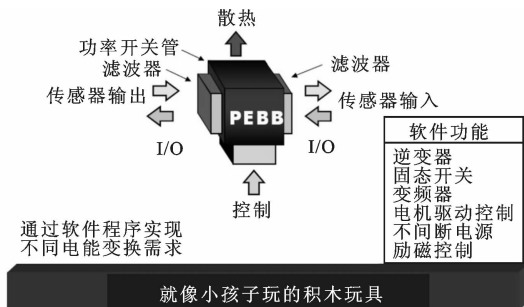


图1 PEBB概念的构成

很强,设计特定电能转换装置时,设计者只需先对单个组件进行设计,然后再进行系统集成,极大地优化了设计过程;③层次化,即PEBB的控制器采用分层分布式结构形式,具有控制结构清晰、变化灵活、易于设计整合等优点;④并行化,即将上述3种模式进行融合,并行技术模式将实现电能转换装置的大容量、低成本和易于生产,使得最大限度地扩展系统成为可能。

2 目标规划理论

相对于传统的设计方法,基于PEBB概念设计电力电子电能变换装置具有明显优势。但是,对于PEBB的拓扑选型、控制器设计、功率等级确定、冗余设计等都存在多种可能,不同的设计方案可能具有不同的设计效果,因此引入运筹学中的目标规划相关理论,对实际问题建立目标规划数学模型^[14-16]。

线性目标规划的一般数学模型为

$$\left. \begin{aligned} \min z &= \sum_{l=1}^L W_l \sum_{k=1}^K (\xi_{lk}^- m_k^- + \xi_{lk}^+ m_k^+) \\ \sum_{j=1}^n c_{kj} y_j + m_k^- - m_k^+ &= h_k, \quad k = 1, \dots, K \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j &\leq (=, \geq) b_i, \quad i = 1, \dots, m \\ y_j &\geq 0, \quad j = 1, \dots, n \\ m_k^-, m_k^+ &\geq 0, \quad k = 1, \dots, K \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:目标函数为 $z=z(m_k^-, m_k^+)$; W 为优先等级; ξ 为权系数; m_k^+ 和 m_k^- 为正、负偏差变量; a 和 c 为系数; y 为决策变量; h 为软约束目标值; b 为硬约束目标值。

对于目标规划问题的求解方法,一般有如下几种^[17]:线性目标规划问题的求解通常采用图解法和多阶段单纯形法;整数型目标规划问题的求解一般采用穷举法或分枝定界解法;非线性目标规划数学模型采用搜索法求解。

3 最优模块化设计数学模型

根据上述目标规划基本理论,基于电力电子模块化组件设计,可以对特定功能的目标电力电子电能变换装置问题建立最优模块化设计数学模型。下面以一种大容量中压变流器为例,按照目标规划问题的一般研究步骤进行建模。

(1)明确问题。变流器需要实现 4 kV 中压直流电网向 710 V 低压直流电网的能量单向传送和电气隔离功能,额定功率为 2 MW。因此,构建变流器的 PEBB 主电路将包含逆变单元、变压器单元、整流桥单元和 LCL 滤波器单元,同时需要对 PEBB 的拓扑、功率等级、冗余度等做出合理决策。

(2)分析现状。由于电力电子器件发展迅速,半导体功率器件种类越来越多,按照控制类型可分为不控型器件、半控型器件和全控型器件。其中不控型器件主要是电力二极管,半控型器件主要是晶闸管,全控型器件主要有门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、集成门极换流晶闸管(IGCT)等。其中 IGBT 作为较高电压等级的全控型器件在工程领域应用较为成熟,所以 PEBB 中的逆变单元采用 IGBT 构建,考虑到变流器只需要实现能量的单向流动,所以采用不控型电力二极管器件构建不控整流桥单元,同时采用全桥拓扑结构以减小输出纹波。表 1 列出了可能用到的 IGBT 和电力二极管型号的参数,其中成本系数是在收集了大量供货商提供的不同型号 IGBT 和电力二极管的价格参数后计算得到的。前面已经说明了 PEBB 可选择的主要拓扑结构,考虑到变流器包括隔离变压器单元,所以逆变单元必须输出双极性交流电压,而 H 桥结构或三相全桥结构更有利于生成双极性交流电压。考虑到模块设计时三相全桥结构比 H 桥结构所用的功率器件多,一方面增加了成本,另一方面增加了发生功率管故障的概率,所以 PEBB 采用 H 桥结构,可以采用两电平拓扑、三电平拓扑或多电平拓扑。

(3)建立目标体系。本文所涉及的变流器主要用途为船用,所以从实际出发,考虑以下几个目标来构成最优模块化设计数学模型的目标体系:第一优先级,可靠性尽量高,功率冗余尽可能大;第二优先级,体积质量尽可能小;第三优先级,总成本尽可能低。优先级排序主要是由特定需求明确的,例如若为陆用商业产品,可以选择总成本较低为最高优先

表 1 功率管选型列表

器件类型	电压/kV	电流/kA	成本系数
IGBT 及反 并联二极管	6.5	0.600	0.060
		0.400	0.055
		0.200	0.050
	4.5	1.200	0.020
		0.650	0.018
		0.300	0.015
	1.7	1.200	0.015
		0.800	0.012
		0.400	0.010
	钳位 二极管	6.5	0.600
0.400			0.045
0.200			0.040
4.5		1.200	0.015
		0.650	0.012
		0.300	0.010
1.7		1.200	0.008
		0.800	0.005
		0.400	0.003
整流 二极管		1.7	3.600
	2.400		0.015
	1.200		0.010

级,但是船用品的首先目标显然是可靠运行。

(4)确定决策变量。变流器模块化设计中需要做出的决策主要有:PEBB 的功率等级和组成变流器的 PEBB 个数,以及 PEBB 采用何种电平拓扑结构。据此可得到 3 个决策变量及其所属的集合,具体为: y_1 代表 PEBB 的功率等级(MW),取 $y_1 \in n|n=7,8,\cdots,20$; y_2 为组成变流器的 PEBB 个数, $y_2 \in \{3,4,5,6\}$; y_3 代表 PEBB 的电平结构,只考虑两电平、三电平和四电平结构,因为电平数再增加会增加控制器设计的难度,同时电平数增加也将导致功率元件增加,进而故障率和成本将升高,所以 $y_3 \in \{2,3,4\}$ 。

(5)确定目标的数学表达式和参数。首先,考虑优先级最高的可靠性和功率冗余目标。变流器的额定功率为 2 MW,额定负载功率为 1 MW,变流器运行时,应具备较高的可靠性和功率冗余性。所有模块的额定功率之和必须达到 $2h_1=2$ MW,权重 $\xi_1=0.3$; 当一个模块发生故障时,剩余模块的额定功率之和必须能够继续维持额定负载 $h_1=1$ MW,权重 $\xi_2=0.4$; 当两个 PEBB 模块发生故障时,剩余 PEBB 的过载功率,即 1.1 倍额定功率之和必须至少能够继续维持 80% 的额定负载 $0.8h_1=0.8$ MW,权重 ξ_3

$=0.3$ 。权重系数 ξ_1 、 ξ_2 和 ξ_3 是根据设备应用时必须具备的 3 个功率冗余目标功能,通过按重要性划分比例得到的。根据以上分析,变流器的可靠性和功率冗余目标表达式为

$$\left. \begin{aligned} y_1 y_2 + m_1^- - m_1^+ &= 2h_1 \\ y_1(y_2 - 1) + m_2^- - m_2^+ &= h_1 \\ 1.1y_1(y_2 - 2) + m_3^- - m_3^+ &= 0.8h_1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其次,考虑第二优先级的体积质量目标。变流器作为船用设备,必须满足一定的体积质量指标,而体积质量与 PEBB 的结构设计相关,精确量化较为困难。因此,采用一个线性化模型假设,引入体积质量系数,一个 PEBB 包括逆变单元、变压器单元、整流桥单元、滤波器单元各一个,设 4 个单元的体积质量系数的基数分别为 0.3、0.4、0.1 和 0.2。考虑到 PEBB 需要实现高压接口,前端支撑电容体积基本不变,逆变单元与整流桥单元和 PEBB 的额定功率无关,所以基数直接转变为系数。但是,随着 PEBB 额定功率的增加,变压器单元和滤波器单元的体积、质量将增加,因此将 PEBB 的额定功率占变流器额定功率 2 MW 的百分比乘以基数,得到变压器单元和滤波器单元的体积质量系数。变流器的目标体积质量系数之和必须在一定范围内,期望目标值 $h_2=1$,同时必须小于上限值 $2h_2=2$,故变流器的体积质量目标表达式包括一个软约束和一个硬约束,分别为

$$\left. \begin{aligned} 0.4y_2 + 0.6(y_1/2)y_2 + m_4^- - m_4^+ &= h_2 \\ 0.4y_2 + 0.6(y_1/2)y_2 &< 2h_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

最后,考虑第三优先级的成本目标。在完成特定功能,达到相关体积质量的指标要求后,应该尽量减小变流器的制造成本。PEBB 的主要组成元件有功率器件、变压器、支撑电容、控制器、LCL 滤波器、柜体框架、二次电源、熔断器、接触器、风扇和水冷管道等。其中功率器件由决策变量 y_2 和 y_3 确定型号和数量,进而确定成本;变压器、LCL 滤波器的成本则由决策变量 y_1 和 y_2 共同决定,而其他元件成本则只由模块数量 y_2 决定。与体积质量目标类似,引入成本系数,设除了功率器件、变压器和 LCL 滤波器之外的元件成本系数之和为 0.4。单个变压器和 LCL 滤波器的成本系数的基数分别为 0.2 和 0.1,将 PEBB 的变流器额定功率 2 MW 的百分比乘以基数便得到单个变压器或 LCL 滤波器的成本系数。功率器件的额定电压电流按照以下原则:变流器的额定输入电流为 500 A,输出电流为 2 817 A,PEBB 模块越多,则单个 PEBB 的额定电流越小,考虑短路

限流工况后选至少 2 倍裕量;多电平拓扑可减小 IGBT 的耐压限制。所以,可得功率器件成本系数之和如表 2 所示,记为 $\varphi(y_2, y_3)$ 。变流器的目标成本系数之和必须在一定范围内,期望目标值 $h_3=2$,同时必须小于上限值 $1.5h_3=3$,故变流器的成本目标表达式也包括一个软约束和一个硬约束,分别为

$$\left. \begin{aligned} 0.4y_2 + 0.15y_1 y_2 + \varphi(y_2, y_3) + m_5^- - m_5^+ &= h_3 \\ 0.4y_2 + 0.15y_1 y_2 + \varphi(y_2, y_3) &< 1.5h_3 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(6)确定其他约束条件。确定了每个目标的数学表达式和参数后,还需要考虑其他的约束条件,主要有决策变量非负条件,即 $y_1 > 0, y_2 > 0, y_3 > 0$ 。

(7)确定最终的目标规划模型。综合上述分析,可以得到变流器的最优模块化设计数学模型

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & W_1(\xi_1 m_1^+ + \xi_2 m_2^+ + \xi_3 m_3^+) + \\ & W_2(m_4^+) + W_3(m_5^+) \\ \text{s. t.} \quad & y_1 y_2 + m_1^- - m_1^+ = 2h_1 \\ & y_1(y_2 - 1) + m_2^- - m_2^+ = h_1 \\ & 1.1y_1(y_2 - 2) + m_3^- - m_3^+ = 0.8h_1 \\ & 0.4y_2 + 0.3y_1 y_2 + m_4^- - m_4^+ = h_2 \\ & 0.4y_2 + 0.15y_1 y_2 + \varphi(y_2, y_3) + m_5^- - m_5^+ = h_3 \\ & 0.4y_2 + 0.3y_1 y_2 < 2h_2 \\ & 0.4y_2 + 0.15y_1 y_2 + \varphi(y_2, y_3) < 1.5h_3 \\ & y_1 \in \{0.05n | n = 7, 8, \dots, 20\} \\ & y_2 \in \{3, 4, 5, 6\}; \quad y_3 \in \{2, 3, 4\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

4 模型求解

由式(5)可知,在第 3 节中建立的变流器最优模块化设计数学模型具有以下特点:决策变量是有界的且范围有限,大部分为整数变量;目标表达式含有非线性因素。因此,该模型是一种整数型目标规划模型,故采用搜索法和穷举法相结合的方式求解。

在模型求解的过程中,首先按照优先级的顺序,在第一优先级范围进行计算, $h_1=1$ 已知,权重系数 ξ_1 、 ξ_2 和 ξ_3 已知,而 $W_1=\xi_1 m_1^+ + \xi_2 m_2^+ + \xi_3 m_3^+$,决策变量 y_1 、 y_2 的范围已定,由式(2),通过穷举法便可以计算出第一优先级目标,如表 3 所示。例如,当 $y_1=0.75, y_2=3$ 时,要满足式(2),即 $0.75 \times 3 + m_1^+ = 2, 0.75 \times (3-1) + m_2^+ = 1$ 和 $1.1 \times 0.75 \times (3-2)$

表 2 功率管选型列表

y_2	y_3	IGBT 及反并联二极管			钳位二极管			整流二极管			$\varphi(y_2, y_3)$
		型号	数量	成本系数	型号	数量	成本系数	型号	数量	成本系数	
3	2	6.5 kV/600 A	12	0.720	6.5 kV/600 A	0	0.000	1.7 kV/3.6 kA	12	0.240	0.960
3	3	4.5 kV/1.2 kA	24	0.480	4.5 kV/1.2 kA	12	0.180	1.7 kV/3.6 kA	12	0.240	0.900
3	4	1.7 kV/1.2 kA	36	0.540	1.7 kV/1.2 kA	24	0.192	1.7 kV/3.6 kA	12	0.240	0.972
4	2	6.5 kV/400 A	16	0.880	6.5 kV/400 A	0	0.000	1.7 kV/2.4 kA	16	0.240	1.120
4	3	4.5 kV/650 A	32	0.576	4.5 kV/650 A	16	0.192	1.7 kV/2.4 kA	16	0.240	1.008
4	4	1.7 kV/800 A	48	0.576	1.7 kV/800 A	32	0.160	1.7 kV/2.4 kA	16	0.240	0.976
5	2	6.5 kV/400 A	20	1.100	6.5 kV/400 A	0	0.000	1.7 kV/2.4 kA	20	0.300	1.400
5	3	4.5 kV/650 A	40	0.720	4.5 kV/650 A	20	0.240	1.7 kV/2.4 kA	20	0.300	1.260
5	4	1.7 kV/800 A	60	0.720	1.7 kV/800 A	40	0.200	1.7 kV/2.4 kA	20	0.300	1.220
6	2	6.5 kV/400 A	24	1.320	6.5 kV/400 A	0	0.000	1.7 kV/1.2 kA	20	0.200	1.520
6	3	4.5 kV/300 A	48	0.720	4.5 kV/300 A	24	0.240	1.7 kV/1.2 kA	20	0.200	1.160
6	4	1.7 kV/400 A	72	0.720	1.7 kV/400 A	48	0.144	1.7 kV/1.2 kA	20	0.200	1.064

+ $m_3^+=0.8$,那么各项偏差 $m_1^+=0.25, m_2^+=0.5$, $m_3^+=0.025$,而 $W_1=0.283$ 。从表 3 可以看出,当 $y_1=0.75, y_2=3$ 时,具有最小的目标值 $W_1=0.283$,此时各项偏差为 $m_1^+=0.25, m_2^+=0.5, m_3^+=0.025$ 。对于第二优先级体积质量目标表达式进行单调性分析可得:取相同决策变量 y_1 后,随着决策变量 y_2 的增大,偏差 m_4^+ 是单调增加的,而取相同决策变量 y_2 ,随着决策变量 y_1 的增大,偏差 m_4^+ 也是单调增加的,因而得到当 $y_1=0.35, y_2=3$ 时具有最小的目标值 $W_2=0.515$,此时偏差 $m_4^+=0.515$,但是违背了第一优先级的解,所以依然按照第一优先级选择 $y_1=0.75, y_2=3$,此时 $W_2=0.875$,偏差 $m_4^+=0.875$,同时也满足了硬约束。最后,考虑第三优先级成本目标,由第一和第二优先级目标确定 $y_1=0.75, y_2=3$,通过查表 3,可以得到当 $y_3=3$ 时, $\varphi(y_2, y_3)$ 取最小值为 0.9,代入成本目标表达式后得到最小的目标值 $W_3=0.438$,偏差 $m_5^+=0.438$,同时也满足硬约束。至此,变流器的最优模块化设计目标规划数学模型求解结束,最优决策变量为 $y_1=0.75, y_2=3, y_3=3$ 。

综上可得,变流器的最优模块化设计数学模型的最优解为 $y_1=0.75, y_2=3, y_3=3$ 时,各项目标偏差分别为 $m_1^+=0.25, m_2^+=0.5, m_3^+=0.025, m_4^+=0.515, m_5^+=0.438$ 。根据决策变量的定义,PEBB 采用三电平 H 桥结构,单个模块的额定功率为 750 kW,变流器由 3 个 PEBB 子模块构成。

表 3 第一优先级目标求解列表

y_1	W_1			
	$y_2=3$	$y_2=4$	$y_2=5$	$y_2=6$
0.35	无解	无解	无解	0.552
0.40	无解	无解	0.396	0.808
0.45	无解	无解	0.601	1.064
0.50	无解	0.290	0.805	1.320
0.55	无解	0.443	1.010	1.576
0.60	无解	0.596	1.214	1.832
0.65	无解	0.749	1.419	2.088
0.70	无解	0.902	1.623	2.344
0.75	0.283	1.055	1.828	2.600
0.80	0.384	1.208	2.032	2.856
0.85	0.486	1.361	2.237	3.112
0.90	0.587	1.514	2.441	3.368
0.95	0.689	1.667	2.646	3.624
1.00	0.790	1.820	2.850	3.880

5 变流器功能实现的试验验证

通过模型求解,确定了 PEBB 的电路拓扑结构和功率等级,从而得到变流器的实现形式如图 2 所示。变流器实现了中压直流电网与低压直流电网的能量接口。

图 2 所示变流器子模块 PEBB 采用带中频隔离环节的三电平 H 桥直流变换电路,包括三电平 H 桥逆变单元、中频变压器单元、整流桥单元和滤波器单元,具体的主电路拓扑结构和对应控制器如图 3 所示。

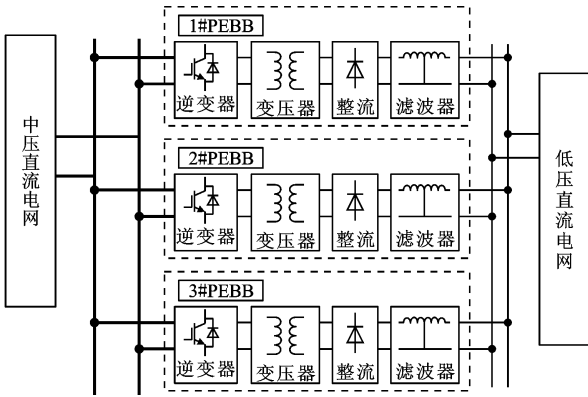


图2 基于PEBB的大容量中压变流器实现形式

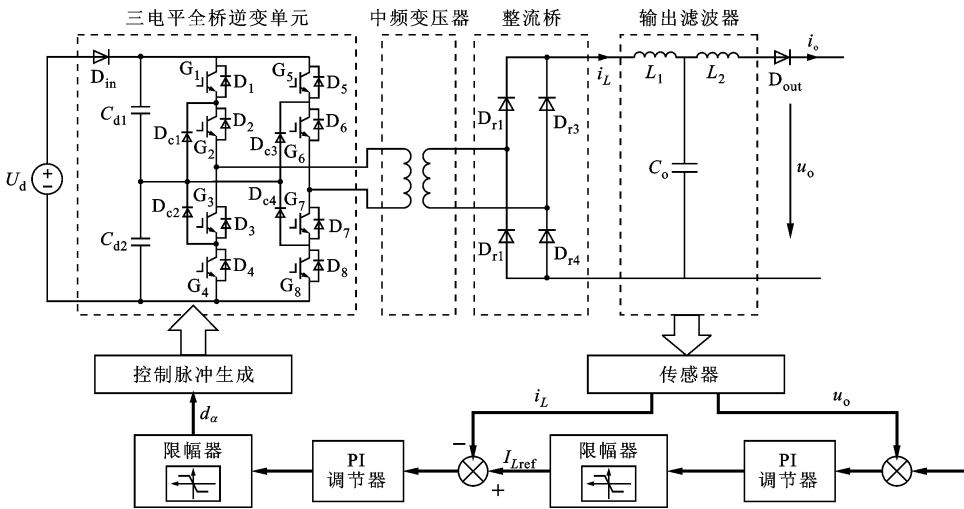
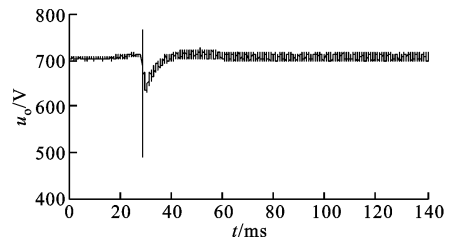


图3 基于PEBB的变流器及控制器结构

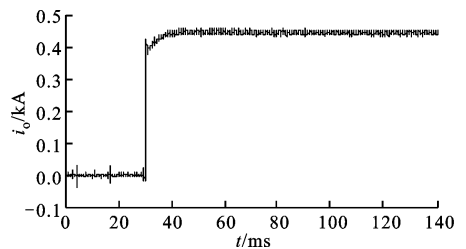
为了验证变流器的功能,进行试验分析如下。额定电量参数 $U_d=4\,000\text{ V}$, $U_o=710\text{ V}$, $I_o=1\,050\text{ A}$, 电路参数 $L_1=0.25\text{ mH}$, $C_o=5\text{ mF}$, $L_2=0.05\text{ mH}$, 变压器原边和副边折算漏感之和 $L_r=0.051\text{ mH}$, 励磁电感 $L_m=127.3\text{ mH}$, 变比 $N_T=0.266$ 。

图4所示为变流器额定工况稳态输出电压 u_o 波形,从中可以看出稳态输出纹波小于3%;图5a和图5b为变流器从空载突加至40%负载时的输出电压和电流波形,其中电压瞬态跌落小于10%。试验结果显示,系统动、静态输出特性较好,变流器功

能得到验证。



(a)突然加载输出电压波形



(b)突然加载输出电流波形

图5 变流器突然加载波形

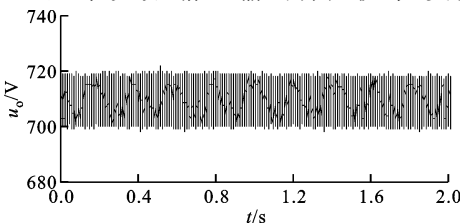


图4 变流器额定负载工况波形

6 结 论

(1)采用PEBB构建电能变换装置具有可靠性高、冗余度大的优点,但是存在最优化模块设计的问题。本文提出的采用目标规划理论建立变流器最优模块化设计数学模型的方法,对电能变换装置模块设计具有指导意义。

(2)变流器的动、静态试验结果验证了变流器最优模块化设计的功能实现。

(3)变流器最优模块化设计数学模型具有一定的对象针对性,需要进一步研究一种最优模块化设计通用目标规划数学模型。

参考文献:

- [1] ERICSEN T. The second electronic revolution (it's all about control) [J]. IEEE Trans on Industrial Application, 2010, 46(5): 1778-1786.
- [2] HINGORANI N, GINN H III, SULLIVAN J. Control/protection architecture for power electronic converters [C]// IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 472-477.
- [3] ERICSEN T. The ship power electronic revolution: issues and answers [C]// IEEE 55th Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1-11.
- [4] MONTI A, PONCI F. PEBB standardization as key enabler for power control flexibility [C]// 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 3695-3699.
- [5] GINN H, PONCI F, MONTI A. Multi-agent control of PEBB based power electronic systems [C]// 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [6] MONTI A, PONCI F. PEBB standardization for high-level control: a proposal [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 59(10): 3700-3709.
- [7] KHERSONSKY Y, HINGORANI N, PETERSON K L. IEEE electric ship technologies initiative [J]. IEEE Industrial Application Magazine, 2011, 17(1): 65-73.
- [8] KHERSONSKY Y. PEBB concept and the IEEE power electronics standards [C]// 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 3679-3683.
- [9] CHEN Zheng, DANILOVIC M, BOROEYEVICH D, et al. Modularized design consideration of a general-purpose high-speed phase-leg PEBB based on SiC

MOSFETs [C]// Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Application. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-10.

- [10] CARMELI M S, CASTELLI-DEZZA F, PIEGARI L, et al. Digital synchronous current control of power electronic building block in modular converters [C]// 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 2909-2914.
- [11] 谢桢,付立军,肖飞,等. 三电平直流变换器平衡中点电位的双移相PWM控制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(4): 64-72.
XIE Zhen, FU Lijun, XIAO Fei, et al. Study of a neutral-point balancing double phase-shift PWM controller for three-level DC/DC converter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(4): 64-72.
- [12] ABOUSHADY A A, AHMED K H, FINNEY S J, et al. Performance analysis of a new modular nanocrystalline core transformer based converter for medium voltage DC transmission application [C]// IEEE 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drivers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 497-502.
- [13] CHAUDHURI T, RUFER A, STEIMER P K. The common cross-connected stage for the 5L ANPC medium voltage multilevel inverter [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2279-2286.
- [14] SIMON H A. Models of man [M]. New York, USA: John Wiley & Sons, 1957.
- [15] IGNIZIO J P. Goal programming and extensions [M]. Lexington, USA: Heath D C and Company, 1976: 12-20.
- [16] REMEO C. Handbook of critical issues in goal programming [M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 1991: 34-38.
- [17] 夏尊铨. 线性与非线性规划引论 [M]. 北京: 科学出版社, 1980: 102-114.
- [18] 谢桢,付立军,肖飞,等. 三电平直流变换器全模式小信号建模和控制器设计 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(6): 109-116.
XIE Zhen, FU Lijun, XIAO Fei, et al. All mode small signal model and control study of the three-level DC/DC converter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(6): 109-116.

(编辑 杜秀杰)