

# 新型输入并联输出串联直流变换器研究

王 瑾<sup>1</sup> 陈 曦<sup>2</sup> 肖 岚<sup>2</sup>

(1. 南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046)

(2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**[摘要]** 针对直流输电的应用要求, 提出了一种新的模块化输入并联输出串联高压变换系统, 并对系统的主电路拓扑、控制策略进行分析与讨论。该系统中主要功率变换模块采用直流变压器, 开环控制, 结构简单; 功率调节模块为串联谐振移相全桥结构, 采用电流闭环控制; 两类模块均为恒频控制; 模块间的控制简单, 具有较高的灵活性和冗余性。仿真和实验结果验证了方案的可行性。

**[关键词]** 输入并联输出串联, 直流变压器, 功率调节模块, 串联谐振移相全桥

**[中图分类号]** TM46 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)01-0001-04

## Research on a Novel Input-Parallel Output-Series Connected HVDC Converters

Wang Jin<sup>1</sup>, Chen Xi<sup>2</sup>, Xiao Lan<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Nanjing University of Post and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

(2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the applicational requirements of DC electrical transmission, the paper proposes a modular input-parallel output-series connected converter topology for HVDC transmission system. Main circuit topologies and control methods are analyzed. The proposed structure has the following features: a) power is transferred mainly by DC transformers, b) the output power is regulated by series resonant phase-shifted full bridge converters which are based on current closed-loop control, c) both DC transformers and power regulation modules are operating at constant frequency, d) modularization structure is flexible. The simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed structure.

**Key words:** Input-parallel output-series, DC transformer, power regulation module, series resonant phase-shifted full bridge converter

随着大规模风电的发展, 轻型高压直流输电技术由于较好地解决了电网间的非同步互联、高压远距离传输以及迅速调节等问题而越来越受人关注<sup>[1-2]</sup>。为了满足高压直流输电的需要, 实现低耐压功率器件应用于高电压输出, 通常采用以下几种方法<sup>[3]</sup>: 多个低压功率器件串联技术、多电平技术、模块多重化串联技术。

多个模块输入并联输出串联 IPOS( Input-Parallel Output-Series) 组合变换器中  $n$  个模块输入并联输出串联, 每个模块的输入侧为低压侧, 输出侧为高压侧, 其中高压侧器件的耐压能力明显降低, 系统的功率处理能力以及可靠性相应提高, 且热应力均匀分布, 非常适合用于高压大功率输出的应用场合, 具有变压器高频工作、扩容方便、不需要大电容器/电抗器储能、开关器件不需要串/并联等优点。

本文针对直流输电的应用要求, 提出了一种新的模块化输入并联输出串联 IPOS( Input-Parallel Output-Series) 高压变换系统, 并对系统的主电路拓扑、控制策略进行分析与讨论, 给出了仿真和实验的结果。

## 1 新型 IPOS 组合变换器拓扑

对于 IPOS 组合变换器, 通过分别控制变换器模块的输出均压或者变换器模块的输入均流, 都可以保

收稿日期: 2011-12-29.

通讯联系人: 肖 岚, 教授, 博士生导师, 研究方向: 功率变换器、新能源发电. E-mail: xiaolan@nuaa.edu.cn

证输出均压、输入均流. IPOS 组合变换器常用的控制方法包括共用占空比型、输入均流内环调节型和电压双环控制型<sup>[4-7]</sup>等. 这几种控制方法中每个模块都需要闭环调节, 随着输出电压的提高以及模块个数的增多, 整个变换器的控制较为复杂, 环路的稳定性要求较高, 且一旦其中某一个损坏, 则会影响到整个变换器的运行; 变换器各个模块电压电流的检测环节较多, 对检测元件的耐压等级、精度和响应速度的要求较高, 价格昂贵.

为了简化控制, 实现变换器的模块化, 本文提出了一种适合用于高压直流输出的拓扑, 如图 1 所示, 此拓扑包括  $N$  个直流变压器功率模块和  $M$  个功率调节模块, 其中  $N$  由单个模块的输出电压以及变换器输出电压的等级决定,  $M$  由功率调节模块的输出电压允许变化范围决定.

该系统结构的主要模块采用的是直流变压器 DCT(Direct Current Transformer)结构, 结构简单, 控制方便, 输入输出电压成比例关系, 可以通过变压器使原边电压  $U_{in}$  折算到副边进行箝位, 实现模块间的自动均压, 在均压的基础上实现模块的输入均流<sup>[8]</sup>.

IPOS 组合变换器的输入侧并联、输出侧串联, 因此首先要求每个模块具有输入输出隔离的特点, 同时 IPOS 组合变换器用于高压大功率场合, 每个模块需要承担较高等级的电压及功率. 因此本方案中直流变压器和功率调节模块均采用全桥结构, 开关管所承受的电压为输入电压, 变压器工作于双向磁化状态, 磁芯利用率较高, 同时充分利用升压变压器的漏感, 实现软开关<sup>[8]</sup>.

功率调节变换器模块作为模块化 IPOS 组合变换器中的一部分, 在升压变换的同时, 要对输出电流进行调节, 具有电流源的特性. 因此选取移相控制全桥串联谐振电路结构, 采用恒频控制的方法<sup>[9]</sup>. 该 IPOS 组合变换器的输出接入高压直流电网, 假设直流电网电压  $U_o$  恒定, 功率调节模块处于低压侧, 采用电流闭环控制, 根据所需的电流参考作为给定, 控制变换器的输出电流  $I_o$ , 且由于变换器的输出侧是串联结构, 所以通过功率调节模块则可以调节整个变换器的输出电流, 从而达到对整个变换器输出功率的控制.

该拓扑虽然无法实现对模块间均压均流的精确调节, 然而在实际应用中尽量保证各个模块参数的一致性, 在工作过程中各个模块输出电压与输入电流基本均衡, 且各个模块的输入输出差异在一定的范围内, 便可极大地简化模块间的控制, 具有较高的灵活性和冗余性.

## 2 IPOS 组合变换器分析

### 2.1 模块间输出电压分析

图 2 给出了 3 个模块下的 IPOS 组合变换器的拓扑结构, 采用 3 个模块输入并联输出串联进行升压. 其中模块 1 与模块 2 为全桥直流变压器, 输出电压分别为  $U_{o1}$  和  $U_{o2}$ ; 功率调节模块采用移相全桥串联谐振变换器拓扑, 主电路在原有的直流变压器基础上, 在低压侧增加了一个谐振电容, 输出电压为  $U_{qo1}$ . 调节模块采用了电流闭环调节模式, 由于 IPOS 变换器模块间的平均输出电流相等, 通过调节谐振变换器的输出电流可以调节 IPOS 组合变换器的输出功率.

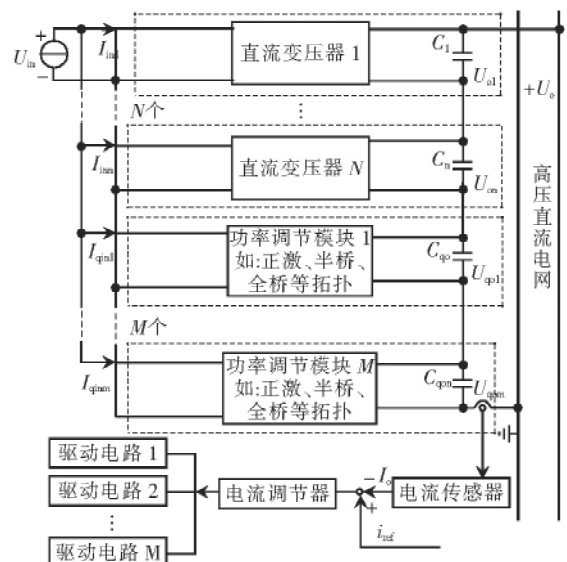


图 1 新型的 IPOS 组合变换器拓扑

Fig.1 Topology of the novel IPOS converter

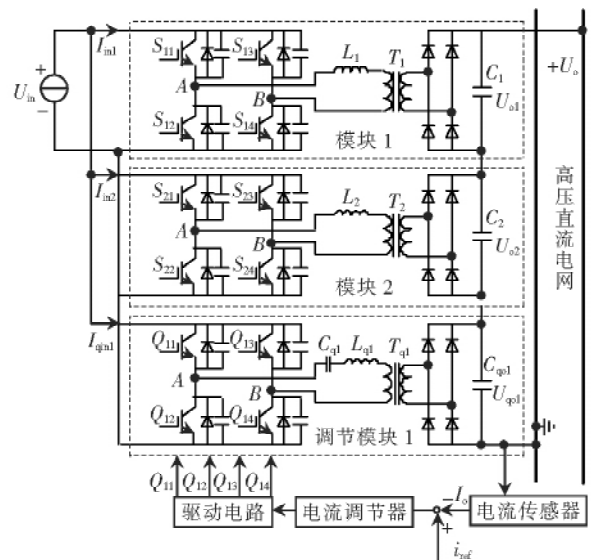


图 2 3 个模块下的 IPOS 组合变换器

Fig.2 IPOS converter with 3 modules

当各个模块的参数基本一致时,在相同条件下可以保证模块的输出电压基本一致,然而当输入电压变动,输出给定电流变化时,各模块的输出电压则相应变化.对于高压直流变压器模块,其输出电压主要受输入电压和负载影响,当输入电压或负载变化时,在模块参数一致的条件下,由于输出可以实现自动均压的效果,输出电压基本保持均衡,压差可以保证在理想的范围内.对于谐振变换器,由于采用电流闭环作用,输出电压受外电路影响,有下列关系:

$$U_{qo1} = U_o - U_{o1} - U_{o2} \quad (1)$$

其中  $U_o$  为高压直流母线,假定为恒值.由式(1)可以看出,功率调节模块的输出电压由直流变压器模块的输出电压决定,所以只要保证直流变压器模块的输出电压变化在一定范围内,功率调节模块的输出电压就可以保证在允许的范围.

## 2.2 仿真分析

根据图2搭建了IPOS组合变换器的仿真模型,仿真波形如图3所示.

图3(a)为给定输出电流为1.5 A时,输入电压由360 V变为400 V情况下IPOS组合变换器3个模块的输出电压的波形.由于高压直流变压器输出电压与输入电压呈正比,所以输入增加时,输出电压随之增加,调节模块的输出电压相应降低.随着输入电压的突变,各模块的输出电压可以保证在允许的范围内,不会发生剧烈的突变.

图3(b)为输入电压380 V时,给定输出电流由3 A变为0.5 A情况下IPOS组合变换器3个模块的输出电压的波形.由高压直流变压器的负载特性知,负载降低时,漏感压降减小,两个直流变压器模块输出电压增加,谐振变换器模块的输出电压相应下降.输出电流在给定范围变化情况下,模块间输出电压的变化可以保证在允许范围内.

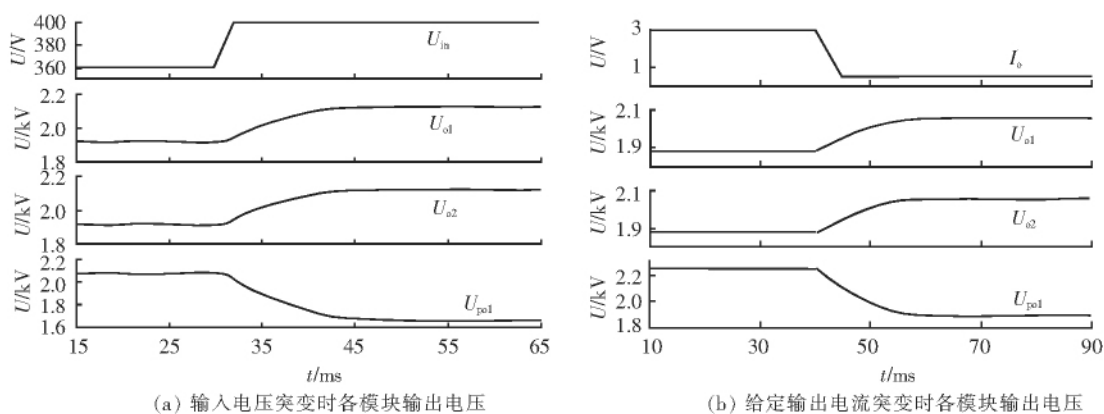


图3 IPOS系统模块输出电压仿真

Fig.3 Simulation results of IPOS converter

仿真表明,在输入电压以及负载在一定范围内变化的情况下,IPOS组合变换器通过功率调节模块可以调节整个变换器的输出电流,从而控制整个变换器输出功率.要保证高压直流变压器的输出电压与调节模块的输出电压尽量均衡,应尽可能减小变压器漏感.

## 3 实验验证

为了验证简化控制的IPOS组合结构,制作了一台高压全桥直流变压器、一台移相全桥串联谐振变换器装置,采用两台高压变换器模块输入并联输出串联工作,来验证上述理论分析的正确性与本设计的可行性.系统采用模块化设计,模块的主电路基本一致,都是采用输出不带滤波电感的全桥结构拓扑,功率调节模块则多出一个谐振电容,谐振变换器工作在谐振频率 $f_r$ 等于开关频率 $f_c$ 状态下.

主电路主要参数为:输入电压210VDC,额定电流3 A,开关频率20 kHz,直流变压器占空比为0.48.变压器漏感作为串联电感 $L_r$ ,且 $L_r = 30 \mu\text{H}$ ;变压器原副边绕组匝数之比 $N_p:N_s = 1:5.5$ ;输出滤波电容 $C = 50 \mu\text{F}$ .

试验中采用输出电压 $U_o = 2140 \text{ V}$ 的电压源模拟高压母线,模块1(全桥直流变压器)与模块2(移相全桥串联谐振变换器)输入并联,输出串联向高压母线输电.图4给出了输入电压变化以及负载变化时原

边电流以及占空比的变化情况,其中  $U_{AB1}$ 、 $U_{AB2}$  分别为模块1与模块2的两个桥臂中点电压波形,  $i_{L1}$ 、 $i_{L2}$  分别为模块1以及模块2变压器原边电流。

图4(a)为输入电压  $U_{in} = 210\text{ V}$ 、 $I_o = 1.1\text{ A}$  时两个模块一起工作的原边电流波形图,此时组合模块处于电流闭环工作,模块1的输出电压  $U_{o1} = 1\,094\text{ V}$ ,模块2的输出电压  $U_{o2} = 1\,046\text{ V}$ 。

图4(b)为输入电压  $U_{in} = 225\text{ V}$ 、 $I_o = 1.1\text{ A}$  时的原边电流波形图,此时模块1的输出电压  $U_{o1} = 1\,160\text{ V}$ ,模块2的输出电压  $U_{o2} = 980\text{ V}$ 。随着输入电压的提高,模块1的输出电压增加,模块2的输出电压相应减小,占空比减小。

图4(c)为输入电压  $U_{in} = 210\text{ V}$ 、 $I_o = 0.94\text{ A}$  时的原边电流波形图,模块1的输出电压  $U_{o1} = 1\,111\text{ V}$ ,模块2的输出电压  $U_{o2} = 1\,029\text{ V}$ 。随着负载的减小,模块1漏感压降减小,输出电压增加;模块2的占空比相应减小,输出电压减小,实现了电流闭环的调节。

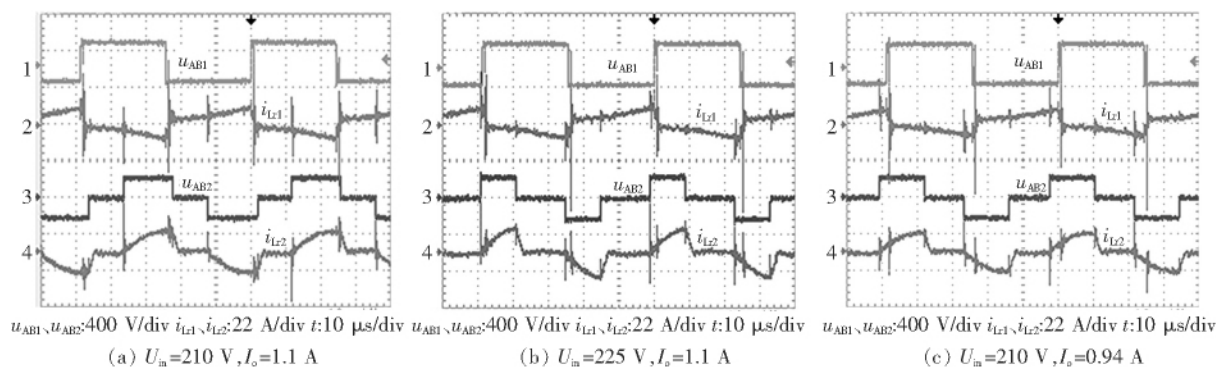


图4 IPOS组合变换器实验波形

Fig.4 Experimental waveforms

## 4 结论

本文针对高压直流输电的应用要求,提出了一种新的模块化输入并联输出串IPOS高压变换电路拓扑,该拓扑的特点是:直流变压器模块开环控制,功率调节模块采用串联谐振移相全桥,两类模块均为恒频控制;电路结构和控制简单,具有较高的灵活性和冗余性。仿真和实验结果验证了该方案的可行性。

## [参考文献](References)

- [1] 张先进,陈杰,龚春英. 输入串联输出并联直流变压器[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(1): 30-36.  
Zhang Xianjin, Chen Jie, Gong Chunying. Input-series output-parallel Dc transformer [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 42(1): 30-36. (in Chinese)
- [2] Ayyanar R, Giri R, Mohan N. Active input-voltage and load-current sharing in input-series and output-parallel connected modular DC-DC converters using dynamic input-voltage reference scheme [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1462-1472.
- [3] Giri R, Choudhary V, Ayyanar R, et al. Common-duty-ratio control of input-series connected modular dc-dc converters with active input voltage and load current sharing [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(4): 1101-1111.
- [4] 陈武,阮新波,颜红. 多变换器模块化组合系统[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 56-61.  
Chen Wu, Ruan Xinbo, Yan Hong. Modularization structure for series-parallel connected converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 56-61. (in Chinese)
- [5] Grbovic P. Master/slave control of input-series-and output-parallel-connected converters: Concept for low-cost high-voltage auxiliary power supplies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2): 316-328.
- [6] 张先进,陈杰,龚春英. 直流变压器研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 144-149.  
Zhang Xianjin, Chen Jie, Gong Chunying. Research on DC/DC transformer [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 144-149. (in Chinese)
- [7] Vandael J P, Ziogas P D. A DC/DC PWM series resonant converter operated at resonant frequency [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, 35(3): 451-460.

[责任编辑:刘健]