

三电平 DC/AC 电源转换技术研究

李瑞生, 翟登辉, 郭宝甫, 张航

(许继集团研发中心, 河南 许昌 461000)

摘要: 以三电平 DC/AC 电源转换为研究对象, 分析对比拓扑结构。从模块化的工程应用角度, 采用改进 T 型方案开发出三电平 DC/AC 标准功率模块, 介绍其结构及屏柜组装方式, 以满足功率组合即插即用, 并适应分布式光伏发电、分布式风力发电、储能、电动汽车等多应用场景。分析目前技术规范现状。基于交直流混合微电网的试验系统, 阐述 DC/AC 模块在不同应用场景下的功能, 并进行了试验验证。

关键词: 随机性电源; 三电平 DC/AC; 模块化; 即插即用

Research of three level DC/AC conversion technology

LI Ruisheng, ZHAI Denghui, GUO Baofu, ZHANG Hang

(XJ Group Corporation Research and Development Center, Xuchang 461000, China)

Abstract: Taking DC/AC power conversion as the research object, this paper comparatively analyzes topology structure. From standpoint of modular engineering application, three level DC/AC standard power module is developed based on improved T scheme and the structure and cabinet assembly are introduced in order to meet the power combination of plug and play, and then to adapt to photovoltaic power generation, wind power generation, energy storage, electric vehicles and other application scenarios. Current situation of technical specifications and standards are analyzed. The function of the DC/AC module in different application scenarios is illustrated and the experiments are carried out based on AC-DC hybrid microgrid test system.

Key words: random power supply; three level DC/AC; modularization; plug and play

0 引言

目前, 分布式光伏发电、分布式风力发电、储能技术正在蓬勃发展。另外, 由于传统燃油汽车持有量迅猛增加, 对环境造成了严重的危害, 因此, 节能环保的电动汽车运用而生, 目前多数采用储能技术的电动汽车充换电站与电网之间为单向流动, 未来电动汽车(Plug-in electric vehicles, PEVs)既可以作为一种随机负荷, 同时也充当一种分布式储能设备, 也可以参与电网的局部能量平衡, 实现与电网的双向互动(V2G 特性), 为大规模分布式电源接入电网, 并网消纳, 提供特殊负荷。分布式光伏、分布式风力、储能和电动汽车以及由它们构成的微电网(本文简称“多应用场景”)都是采用相同的电源转换装置(DC/AC)接入电网, 因此可以将其统一按照“随机性电源”^[1]考虑, 如图 1 所示(虚框部分

根据不同应用场景中具体需求进行选择配置)。采用统一的 DC/AC 功率模块, 进行自主并联, 实现不同容量电源转换的自由构建, 实现相同的标准 DC/AC 功率模块在不同应用场景下的即插即用。

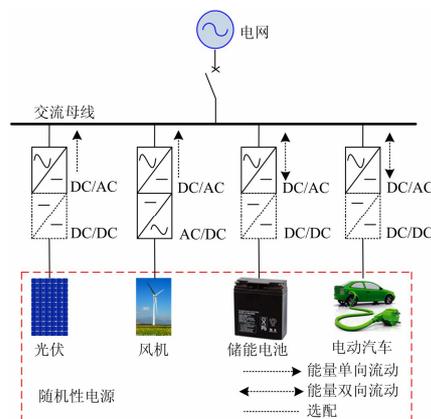


图 1 随机性电源经 DC/AC 接入电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of random power supply DC/AC connected to grid

目前 DC/AC 功率模块采用的脉宽(PWM)电源转换技术由两电平向三电平、多电平发展。电平数是指 DC/AC 的输出(滤波电感前(对母线电压的中点 N 的电压等级的相电压, 若只有 $\pm U/2$, 则是两电平, 其线电压为 $0, \pm U$; 若只有 $0, \pm U/2$, 则是三电平, 其线电压为 $0, \pm U/2, \pm U$; 若电压等级数大于 3, 则是多电平, 比如五电平的相电压有 $0, \pm U/4, \pm U/2$, 其线电压为 $0, \pm U/4, \pm U/2, \pm 3U/4, \pm U$ 。如图 2 所示。

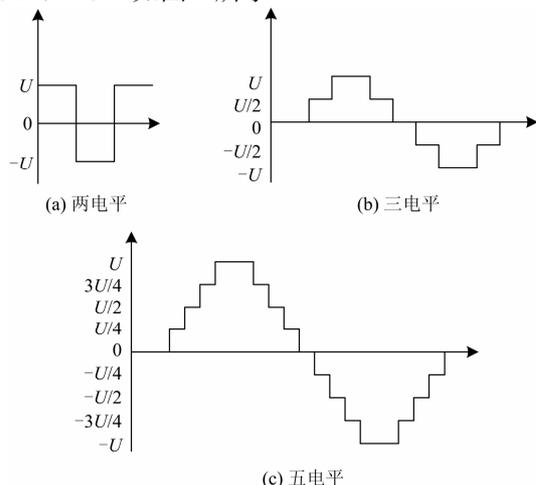


图 2 两电平、三电平以及五电平的线电压图

Fig. 2 Line voltage diagram of two level, three level and multilevel

相对于两电平而言^[2-3], 三电平具有以下主要优点: 1) 谐波含量低, 滤波电感量小; 2) 开关频率较低, 开关损耗较小, 开关动作时的电压变化率(du/dt)小, 引起的电磁干扰(Electro Magnetic Interference, EMI)较小; 3) 系统效率高, 易于模块化并联。而多电平的电平数越多, 其输出电压波形就越接近于正弦波, 但是其拓扑结构以及控制系统较为复杂。基于此, 采用三电平 DC/AC 功率模块, 实现功率模块自主并联以构成大容量电源转换是随机性电源即插即用的发展方向。

三电平 DC/AC 功率模块可实现双向、高功率密度、高转换效率, 但模块化并联是个难题, 尤其实现无通信互联线的自主并联是较大的技术瓶颈。结合国家能源应用技术研究项目《基于分层储能的主动配电网关键装备研制》、国家 863 科技项目《高密度分布式能源接入交直流混合微电网关键技术》、国网公司科技项目《高渗透率分布式光伏发电中储能技术研究及应用》, 以三电平 DC/AC 电源转换装置为研究对象, 分别从拓扑结构对比及 T 型结构改进、模块化的工程应用、技术规范和标准、试验验证方面进行研究。

1 拓扑结构对比

1.1 拓扑结构

利用开关管来辅助中点箝位形成的三电平主电路拓扑由德国学者 Holtz 于 1977 年首次提出。目前将三电平拓扑结构归纳起来, 主要有三种^[4-5]: 1) 中点箝位三电平(Neutral Point Clamped Three-level Inverter, NPC)拓扑结构, 也称二极管箝位三电平拓扑结构; 2) 飞跨电容型三电平拓扑结构; 3) 混合箝位式三电平结构, 如图 3 所示。

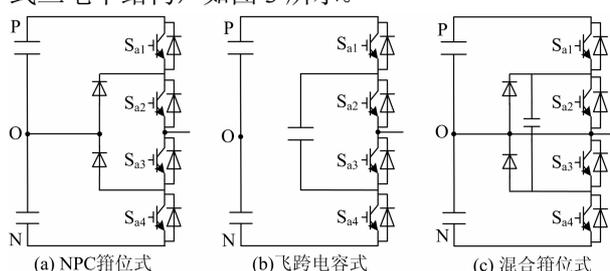


图 3 三电平拓扑结构

Fig. 3 Three level topology

其中图 3(a)为 NPC 的典型结构, 属于 I 型拓扑。除了典型 NPC 三电平拓扑外, 其衍生拓扑结构^[6]主要有 I 型带电容分压器结构、I 型有源 NPC、T 型拓扑结构(分共集电极和共发射极两种), 如图 4 所示。

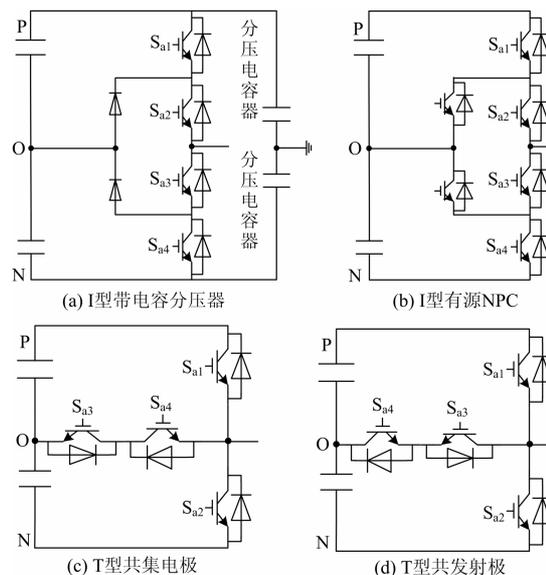


图 4 NPC 三电平行生拓扑结构

Fig. 4 Three level NPC topology

1.2 几种 NPC 拓扑比较

图 4(a)中, I 型带电容分压器的 NPC 可以避免直接与直流侧中点连接, 进而降低共模漏电流。图 4(b)中, I 型有源 NPC 采用有源箝位方法, 将传统典型 NPC 结构中的箝位二极管改成了带反并联二极管的

有源开关管，控制更加灵活，增加了续流回路，提高了系统控制自由度，但是控制方法相对复杂。图4(c)代表 T 型拓扑结构，另外 T 型拓扑结构中，用具有反向阻断能力的新型功率开关管 RB-IGBT 代替反向串联的开关管^[6]，可以降低损耗、提高逆变效率并且减少电源转换装置体积，其拓扑结构如图 5 所示。

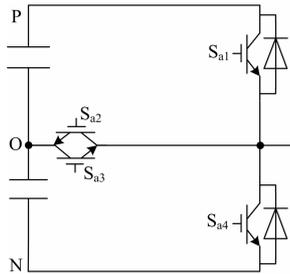


图 5 具有反向阻断能力 RB-IGBT 的 T 型拓扑结构

Fig. 5 T type topology based on RB-IGBT

分析 T 型与 I 型差异：

- (1) 耐压方面，理论上 I 型电路优于 T 型电路，从实际应用角度分析，二者相差不大。
- (2) 损耗方面，当开关频率小于 20 kHz 时，T 字型要优于 I 型。
- (3) 元件数量方面，T 字型少两个二极管。
- (4) 控制时序方面，I 型需先关断外管，再关断内管，防止母线电压加在内管上导致损坏，T 型则无时序要求。
- (5) 换流路径方面，I 型拓扑的换流路径分为短换流路径与长换流路径，当用分立模块时，必须注意其杂散电感与电压尖峰问题；T 型拓扑的外管与内管之间的转换路径一致，只有一个换流回路，具体换流路径如图 6 所示。

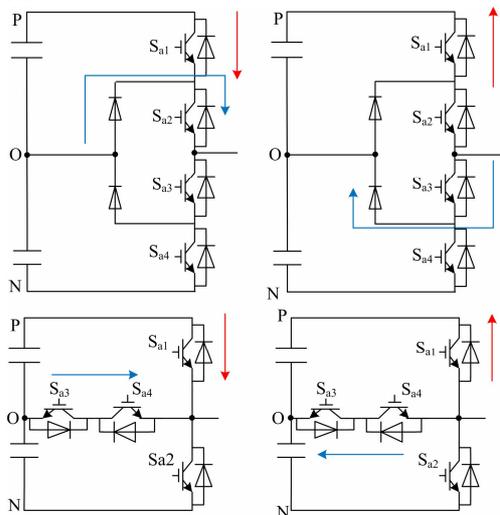


图 6 I 型与 T 型换流路径

Fig. 6 Flow path of I type and T type

1.3 飞跨电容型与典型 NPC 比较

与典型 NPC 三电平拓扑结构比较，飞跨电容型优点是：1) 克服了使用太多二极管的问题；2) 具有多种组合的开关方式，这些开关组合方式可以用来平衡电容上的电压；3) 飞跨电容的存在使得输出电压的谐波畸变率和开关器件的 du/dt 相对较小，而且开关器件处于阻断情况下电压也比较均衡。飞跨电容型的缺点是：1) 需要大量的钳位电解电容，系统体积大，不便于系统集成；2) 频繁充放电使得钳位电容寿命短，可靠性差。

NPC 三电平拓扑与飞跨电容型拓扑的对比结果见表 1。

表 1 NPC 与飞跨电容型拓扑对比

Table 1 Comparison of two kinds of three level topology

拓扑结构	NPC	飞跨电容
每相开关管个数	4	4
每相钳位二极管个数	2	0
每相电容个数	0	1
损耗分布	不均匀	平均
可靠性	高	低
电容体积	小	大

1.4 混合箝位式与典型 NPC 比较

相对于典型 NPC 拓扑来说，混合箝位式增加了箝位电容，使得每个桥臂的第二、三功率管不能同时导通，否则，导致箝位电容短路，从而零电平的获得便会出现两种状态，也就是说每一个桥臂的开关状态由原来的三个增加到四个；另外，其电压空间矢量增至 64 种，因此，增加了系统控制灵活性与复杂性。

1.5 改进 T 型电路

传统的 T 型电路存在以下问题：1) 共模滤波回路没有和差模滤波回路解耦，共模滤波器谐振频率较高，易发生谐振；2) 采用 SVPWM 算法时，中线上会通过较大的零序电流，会增加系统损耗。

综合各种因素考虑，本文选用一种基于共模和差模滤波器解耦的结构方案：将 LCL 滤波电容分为并联的两部分，仅将其中容值较小的滤波电容公共点引回直流侧电容中点，以降低共模和差模滤波回路之间的耦合程度，便于两者分别进行独立设计，如图 7 所示。该拓扑结构不影响 LCL 滤波器的滤波效果，共模滤波回路的电容可以取得较小，从而提高了回路阻抗，减小了中线电流，提高了共模回路谐振频率，避开了易发生谐振的频段。

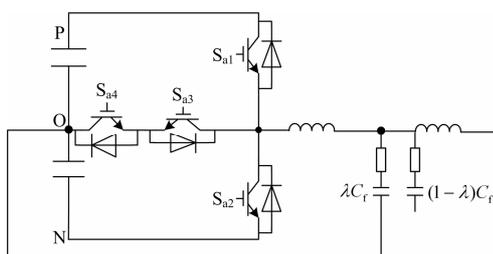


图 7 基于共模和差模滤波器解耦结构的拓扑图

Fig. 7 Topology based on the common mode and differential mode filter decoupling structure

2 模块化的工程应用

2.1 标准功率模块设计

相关 DC/AC 设备制造厂家根据随机性电源不同应用场景设计开发出专用的电源转换装置, 比如光伏逆变器、储能变流器、风机变流器以及充放电设备等电源转换装置, 为实现通用化和标准化, 开发设计了即插即用 DC/AC 标准功率模块(以下统称为“DC/AC 模块”), 有以下特点: 1) 易于模块化设计; 2) 系统稳定性更好; 3) 功率密度更高, 产品体积更小; 4) 可自主并联。其中模块化设计使部件灵活装卸调配、易于扩容维护、易于不同功率自由组合, 能够降低模块内部功率开关管的电流应力, 提高使用寿命。

DC/AC 模块规格有 10 kW、20 kW 和 50 kW 三种容量, 机箱高度分别为 2U、4U 和 6U 的标准尺寸, 如图 8 所示。DC/AC 模块采用机架式设计, 更大功率如 250 kW、500 kW 等采用标准屏柜安装。



图 8 10 kW、20 kW 和 50 kW 的 DC/AC 模块

Fig. 8 DC/AC module of 10 kW, 20 kW and 50 kW

DC/AC 模块可灵活组合, 满足不同系统不同容量需求, 实现随机性电源功率匹配的即插即用; 在功率模块中植入不同的软件功能, 实现多应用场景的即插即用, 如图 9 所示。

2.2 模块化并联

传统单台 DC/AC 装置容量已无法满足当前大功率应用需求, 如果继续采用单台大容量方案, 流过器件的电流过大, 设计较为困难、体积笨重。而模块化并联是解决该问题的一个有效途径, 能够实现冗余并联方式运行, 提高系统可靠性, 还可以实现源荷功率均分。模块化并联虽有很多优点, 但还需要解决以下问题^[7]。

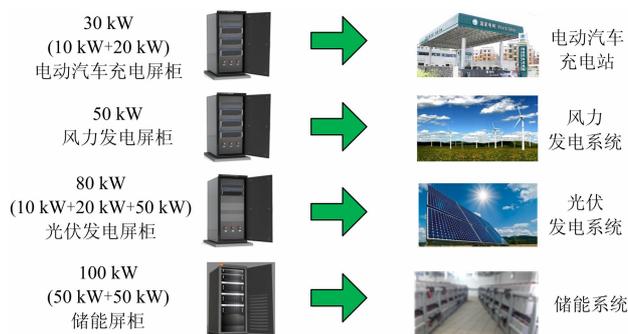


图 9 应用于多应用场景的标准屏柜

Fig. 9 Standard cabinets applied in many scenes

1) 能量均匀问题, 不同功率的模块并联, 如 10 kW 与 50 kW 并联组成 60 kW; 相同功率的模块并联如 50 kW 与 50 kW 并联组成 100 kW; 并联后必须对各模块应分担的功率进行均匀控制; 否则, 可能会导致单模块通过电流过大而损坏。

2) 环流问题, 模块并联后, 将在直流侧与交流侧之间形成一个环流通路, 模块滤波参数的差异、占空比不一致、电压电流相位不一致、死区时间不一致、开关动作不一致等因素导致模块之间出现环流, 如果环流较大则导致器件损坏, 因此必须进行环流抑制。文献[8]分析了并网逆变器并联后产生环流的机理, 建立了基于 dq 旋转坐标系下的状态平均模型, 通过调节每个 PWM 周期的零矢量作用时间来抑制环流。文献[9]通过设计一种环流阻抗控制器来对环流幅值和相位进行解耦控制, 有效抑制了环流。文献[10]提出了一种虚拟阻抗的概念, 通过控制将其等效为一个串联阻抗, 进行了环流抑制。文献[11-15]采用下垂控制策略对模块并联进行了均流控制和环流抑制。具体模块化并联技术将在后续文章专门介绍。

3 技术规范

DC/AC 电源转换作为随机性电源接入配电网的功率接口关键技术, 国内外已有很多标准及技术规范, 比如《DG 并网技术标准 IEEE Std.1547》、《Q/GDW 564-2010 储能系统接入配电网技术规定》、《NBT 32004-2013 光伏发电并网逆变器技术规范》、《NB/T 33002-2010 电动汽车交流充电桩技术条件》等。

目前这些标准大多是针对特定应用场景, 比如光伏逆变器、储能变流器、电动汽车充放电设备等, 并未对 DC/AC 电源转换技术的共性特征抽象提取。根据前述已开展的课题研究, 申请的能源行业标准《三电平双向 DC/AC 技术规范》已获批, 主要是把电源转换 DC/AC 共性特征提取出来, 规范 DC/AC

输入输出、具备不同的控制模式、具备单向/双向能量流动特征，根据不同应用场景，植入不同软件，实现光伏逆变、风机变流、储能变流、充放电设备、协调控制器等不同应用场景功能，实现电源转换多应用场景的即插即用。

4 试验验证

4.1 验证系统介绍

为满足前述已开展的课题研究，搭建了交直流混合微电网试验系统，如图 10(虚框的 DC/DC 模块可以根据系统实际需求选择配置)。

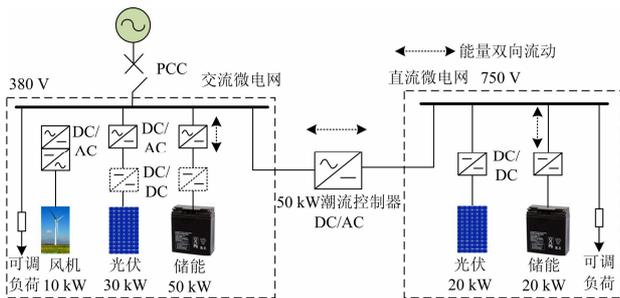


图 10 交直流混合微电网试验系统接线

Fig. 10 Test system wiring diagram of AC/DC hybrid microgrid

1) 应用一(光伏/风机变流器)

DC/AC 模块采用恒功率控制模式(PQ 控制)方式单向并网发电：(1) 应用于光伏发电系统，构成光伏逆变器，根据系统需求选择是否与 DC/DC 模块配合使用；(2) 应用于风力发电系统，构成风机变流器。

2) 应用二(储能变流器/充放电设备)

DC/AC 模块，是否需要与 DC/DC 模块配合使用，可以根据直流侧电压大小确定。

(1) 离网运行，对储能变流器来说，一种是采用恒定电压频率控制模式(V/f 控制)构成储能变流器，实现对交流负载单独供电；一种是用于微电网时，为实现对等控制，采用下垂(droop)控制或者虚拟同步机(VSG)控制，实现多机无通信线并联运行，自动对负荷功率进行动态合理分配。

(2) 并网运行，采用 PQ 控制方式构成储能变流器或充放电设备，实现电池与电网之间的能量双向互动。或者采用 droop 控制、VSG 控制参与电网的调频调压。

(3) 应用三(交直流混合微电网，协调控制器)DC/AC 模块应用于交直流混合微电网，作为图 11 中协调控制器使用，主要有如下所述功能。

a) 交流电网正常连接：交流微电网与交流电网并网运行；协调控制器采用恒电压控制(V 控制)，用于稳定直流微电网的直流母线电压，保证直流微电网稳定运行。

b) 交流电网断开：协调控制器的具体工作状态有以下几种情况：① 选择直流微电网的一个用于储能的 DC/DC 模块来稳定直流侧母线电压，潮流控制器采用 V/f 控制方式稳定交流微电网的交流母线电压。② 选择交流微电网的一个储能用 DC/AC 模块来稳定交流侧母线电压，协调控制器采用 V 控制方式稳定直流微电网的直流母线电压；③ 选择直流微电网的一个储能用 DC/DC 模块来稳定直流侧母线电压，选择交流微电网的一个储能用 DC/AC 模块来稳定交流侧母线电压，协调控制器处于备用状态，当交流微电网或直流微电网内部出现能量不平衡时，协调控制器采用 PQ 控制方式进行能量协调。

4.2 试验验证

针对 DC/AC 模块在多应用场景下的特定功能，为验证功能有效性，采用图 7 的基于共模和差模滤波器解耦结构拓扑研制了 DC/AC 模块，在图 11 试验系统基础上，分别对应用一、应用二和应用三进行了相关试验，具体试验内容见表 2。

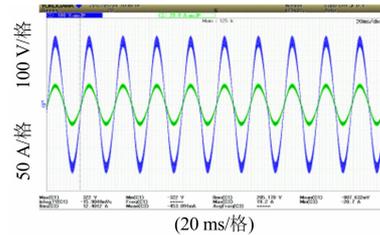


图 11 光伏并网逆变器的电压和电流波形

Fig. 11 Voltage and current wave of PV grid-connected inverter

表 2 试验内容

Table 2 Test content

	应用场景	控制模式	能量流动方向
DC/AC 功率模块	光伏/风机逆变	PQ 控制	单向
	储能变流	V/f 控制	双向或单向
	充放电设备	PQ 控制	双向
	协调控制器	V 控制	双向

1) 试验一(光伏/风机逆变，PQ 控制)

图 11 中，通道 □ 代表电压波形，通道 □ 代表并网电流，光伏逆变器采用 PQ 控制方式，以单位功率因数并网运行。

风机变流器采用 AC/DC+DC/AC 电源转换形式，其原理同光伏逆变器相同。

2) 试验二(储能变流/充放电设备)

(1) 储能变流器(离网，V/f 控制)

针对应用二，DC/AC 模块用来稳定交流侧电压和频率，对交流负载供电。

图 12 中，DC/AC 模块初始空载运行，一段时间

后, 突加 10 kW 阻性负载, 通道 ① 代表 DC/AC 模块交流侧电压; ② 代表 DC/AC 模块直流母线侧电压; ③ 代表 DC/AC 模块交流侧负载电流; ④ 代表 DC/AC 模块直流侧电流。图 13 表明, 交流侧电压稳定不变, 直流侧母线电压稍微下降后快速趋于稳定。

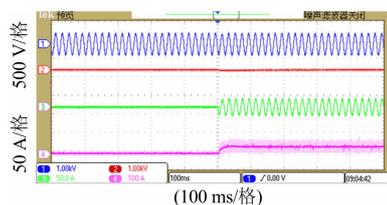


图 12 离网模式下交流侧和直流侧的电压及电流
Fig. 12 Voltage and current of AC side and DC side based on off-grid mode

(2) 储能变流器(并网, VSG 控制)

图 13 表明, 通道 ① 为交流侧电压波形, 采用 VSG 控制时, 非计划孤岛下并网到离网切换时, 实现了无缝平滑切换。

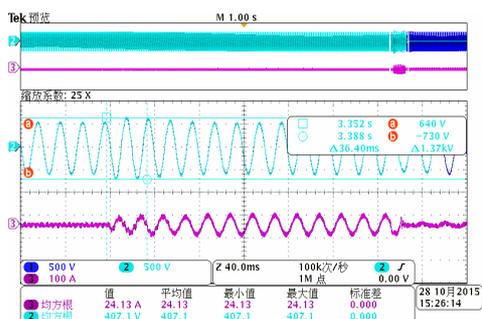


图 13 并网模式下储能变流器的电压和电流波形
Fig. 13 Voltage and current wave of stored energy converter based on on-grid mode

(3) 充放电设备(PQ 控制)

针对应用二, DC/AC 模块作为充放电设备, 实现储能电池与电网之间的能量双向互动。

① 充电

图 14 为蓄电池从 0 kW 到 20 kW 的充电波形, 通道 ① 代表电网电压; 通道 ② 代表交流侧电流。

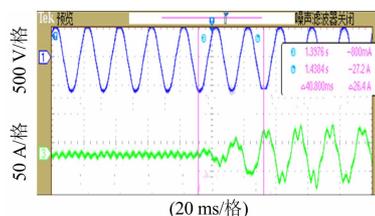


图 14 充电模式下交流侧电压及电流
Fig. 14 Voltage and current of AC side based on charge mode

② 放电

图 15 为蓄电池从 0 kW 到 20 kW 的放电波形, 通道 ① 代表电网电压; 通道 ② 代表交流侧电流。

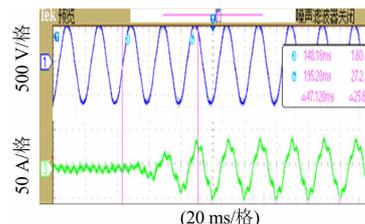


图 15 放电模式下交流侧电压及电流
Fig. 15 Voltage and current of AC side based on discharge mode

③ 放电—充电转换

图 16 为蓄电池从 20 kW 放电到 20 kW 充电的波形, 通道 ① 代表电网电压; 通道 ② 代表交流侧电流。

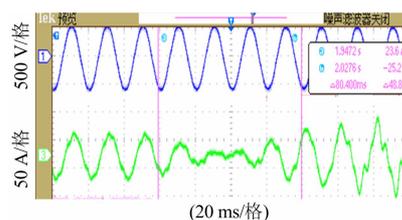


图 16 放电-充电转换的交流侧电压及电流
Fig. 16 Voltage and current of AC side based on discharge-charge mode

3) 试验三(交直流混合微电网, 协调控制器)

针对应用三, DC/AC 模块用作协调控制器, 当工作于 V/f 控制时, 波形同如图 13。当工作于 PQ 控制模式时, 波形同图 4—图 16。

当交流电网正常连接, DC/AC 模块采用 V 控制方式稳定直流微电网直流母线电压, 波形如图 17。

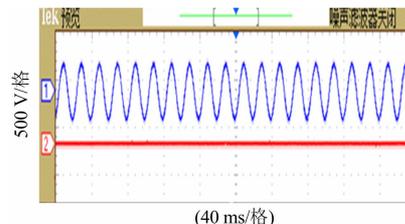


图 17 并网模式下交流侧和直流侧的电压及电流
Fig. 17 Voltage and current of AC side and DC side based on grid mode

图 17 中, 通道 ① 代表电网电压; 通道 ② 代表直流母线电压, 非常稳定。

5 结语

(1) 分析对比三电平 DC/AC 拓扑结构, 采用基于共模和差模滤波器解耦的改进 T 型结构方案, 开

发适用于模块化的三电平 DC/AC 功率模块。

(2) 从模块化的工程应用角度, 介绍了 DC/AC 标准模块结构, 以适应多应用场景和功率匹配的即插即用。

(3) 从技术规范角度, 简介三电平双向 DC/AC 技术规范现状;

(4) 基于交直流混合微电网的试验系统, 介绍了 DC/AC 模块在多应用场景下的功能, 并进行了试验验证。但是对采用 VSG 控制来说, 实现两机无通信线并联运行是难点, 需要下一步研究和试验。

参考文献

[1] 李瑞生. 云—层—端三层架构体系的随机性电源即插即用构想[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 47-54. LI Ruisheng. The idea of random power supply plug and play based on cloud-layer-terminal three layer architecture[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 47-54.

[2] 刘凤君. 多电平逆变技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[3] MA Lin, SUN Kai, JIN Xinmin. A transformation method from conventional three phases full-bridge topology to conergy NPC topology[C] // International Conference on Electrical Machines & Systems. 2009. ICEMS 2011. International Conference on. 2011: 1-5.

[4] WEI Sanmin, WU Bin. A general space vector PWM control algorithm for multilevel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 22(2): 562-568.

[5] TAKAHASHI N A I, AKAGI H. A new neutral point clamped PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Industry A, 1981, 17(5): 518-523.

[6] 童鸣庭. 三相 T 型三电平非隔离并网逆变器的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013. TONG Mingting. Research on three-phase T-type three-level non-isolated grid-connected inverter[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

[7] 刘拓夫. 模块化并联三相光伏并网逆变器的设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. LIU Tuofu. Design of modular parallel three-phase photovoltaic grid-connected inverter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[8] 杨勇, 阮毅, 汤燕燕, 等. 风力发电系统中并网逆变器并联运行环流分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2012-2018. YANG Yong, RUAN Yi, TANG Yanyan, et al. Analysis of circulating current for direct parallel grid-connected inverters[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 2012-2018.

[9] YU Mi, KANG Yong, ZHANG Yu, et al. A novel decoupled current-sharing scheme based on circulating-impedance in parallel multi-inverter system[C] // Industrial Electronics Society. IECON 2007. 2007:

1668-1672.

[10] 王瑞琪, 程艳, 孙树敏, 等. 基于坐标旋转虚拟阻抗的微电网控制与性能分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 78-86. WANG Ruiqi, CHENG Yan, SUN Shumin, et al. Control and performance analysis of microgrid based on coordinate rotational virtual impedance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 78-86.

[11] WEI Y, MIN C, JOSEP M. Design and analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2011, 78(5): 213-246.

[12] 顾和荣, 赵巍, 王雷, 等. 微电网逆变器电流下垂控制分析与试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 45-48. GU Herong, ZHAO Wei, WANG Lei, et al. Analysis and experimental verification of current droop control for microgrid inverters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 45-48.

[13] 李国庆, 谭龙, 王振浩, 等. 单相接地故障对换流器内部环流影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 1-7. LI Guoqing, TAN Long, WANG Zhenhao, et al. Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 1-7.

[14] 高建, 苏建徽, 高航, 等. 模块化多电平换流器电容电压与环流的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 56-62. GAO Jian, SU Jianhui, GAO Hang, et al. Capacitor voltage and circulation current control strategy in modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 56-62.

[15] 徐千鸣, 罗安, 马伏军, 等. 考虑低频振荡的 MMC 有源阻尼环流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 118-126. XU Qianming, LUO An, MA Fujun, et al. Circulating current suppressing method based on active damping control of MMC considering low-frequency oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 118-126.

收稿日期: 2016-03-07; 修回日期: 2016-05-28

作者简介:

李瑞生(1966-), 男, 硕士, 教高, 研究方向为继电保护、分布式发电接入及微电网稳定控制运行等; E-mail: ruisheng@139.com

翟登辉(1984-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为分布式发电、微电网系统研究以及关键电力电子设备的开发。E-mail: zdh-11123@163.com

(编辑 葛艳娜)