

一种适应于两级直流配电系统的光伏直流变换器及控制策略研究

郝利东¹, 潘尚智¹, 蒋建波¹, 官金武¹, 罗海云², 康鹏举³, 王文萃²

- (1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;
2. 西安西电电力系统有限公司, 陕西 西安 710065;
3. 西安西电电气研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 针对高渗透率光伏接入的直流配电系统,分析确定光伏直流变换器的各系统参数要求,并结合最大功率跟踪、转换效率、系统配电效率和可靠性等方面的要求,对变换器的拓扑结构进行研究,确定系统构架方案,实现易扩展、可配置、易故障隔离,具备宽特性分布式接入能力,适用于不同的功率等级和应用场景;以 LVDC 为变换器前后级的功率解耦总线,提出离并网条件下光伏端、储能端和输出端的多端口功率协调控制技术,及 LVDC 和 MVDC 两级直流母线的能量控制策略,对光伏多端口直流配电系统的研究与推广具有指导意义。

关键词: 高渗透率光伏; 直流配电; 接入能力; 协调控制; 能量控制

DOI: 10.12067/ATEEE1904004 **文章编号:** 1003-3076(2019)08-0071-10 **中图分类号:** TM46

1 引言

当前,能源需求与短缺已成为尖锐的问题,节能减排、大规模利用可再生能源、低碳经济已经成为世界各国一致的目标,促使人类转向更绿色高效的能源解决方案^[1-3]。由于太阳能发电的间歇性特点,大规模接入会给电网稳定性形成巨大威胁,限制了太阳能的进一步高效利用。由于集中式地面光伏电站占地面积过大、远距离电能传输困难、弃光率高等问题,分布式光伏入网技术,特别是以分布式多端口接入形式高效汇集到中低压直流配电系统的并网技术,将是消纳大规模太阳能入网的关键技术。分布式光伏发电系统借助先进的电力电子技术,对本地资源进行智能调控,发挥能源互补性优势,为本地用户和配电网提供优质、可靠、稳定及可调度的电能,成为智能电网中的研究热点。

相对于交流配电系统,直流配电系统具有损耗较小、传输容量较大、传输距离远、效率高、可控性好及适应潜在直流负载等技术特点^[4,5],作为未来电

力系统的重要形态^[6],已得到学术界与工业界的广泛关注,并已应用于数据中心等场合。考虑到光伏阵列的直流输出特性,低压直流配电系统易于实现大规模可再生能源系统的集成化,具有适用于广泛的应用场景等优点;配置储能系统,可将多余能量储存,平滑直流配电系统中可再生能源发电与功率消耗间的功率流动,提供高质量的电能^[4-7]。

光伏阵列输出低压直流配电系统连接到中压直流配电系统通常需要高压功率变换。目前国内外对光伏直流并网系统的研究主要涉及采用低压直流(Low Voltage Direct Current, LVDC)母线的微网系统,而光伏阵列连接至中压直流(Medium Voltage Direct Current, MVDC)母线的微网系统研究较少。级联多电平变换器具备模块化结构、器件等级低、谐波含量少等^[5-9]优点,已广泛应用于将大规模光伏发电系统接入中压交流配电系统。光伏阵列接入直流微网系统以最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)模式运行实现能量获取的最大化^[10-13]。当光伏阵列间输出功率不平衡时,易造

收稿日期: 2019-04-01

作者简介: 郝利东(1987-),男,河北籍,博士研究生,研究方向为分布式直流微电网技术等;
潘尚智(1976-),男,浙江籍,教授,博士,研究方向为智能电力电子接口技术、分布式太阳能发电技术、分布式直流微电网技术等(通讯作者)。

成级联 DC-DC 变换器输出电压的不平衡现象,变换器的输出电压变化范围较宽。非隔离型 DC-DC 变换器常应用于电压等级较低的直流配电系统,而隔离型 DC-DC 变换器适应于电压等级较高的中压直流配电系统。国内外学者针对隔离型 DC-DC 变换器在新能源领域的应用做了相关研究^[5-9]。

两级 DC-DC 模块化多电平变换器^[14-19] (Modular Multilevel Converter, MMC) 技术,可应用于光伏阵列升压至中压直流配电系统。前级 DC-DC 变换器用于独立地实现 MPPT 功能,并保证光伏阵列与配电系统之间电气隔离;后级半桥单元与输出滤波器电感级联。当变换器前级实现独立的 MPPT 功能时,各功率单元的平均电压输出与其他功率单元不同,由于后级半桥单元的作用,可在占空比变化的情况下获得相同的直流母线电压;当变换器前级实现 MPPT 功率差额较大时,形成的占空比也不尽相同,导致电感电流应力增大和传输损耗上升。此外,变换器结构模块化与可扩展性受到限制^[20-22]。

输入并联输出串联 (Input-Parallel Output-Series, IPOS) 系统在低输入电压和高输出电压的应用场合有着广泛的应用前景,可用于将光伏阵列连接到中压直流配电系统^[20-22]。模块化串并联系统稳定运行的关键问题之一是保证各模块串联侧电压均衡,其中自主均压控制策略已在输入串联输出串联 (Input-Series Output-Series, ISOS) 系统以及输入串联输出并联系统实现^[22-24]。但是上述控制策略不能直接应用于含光伏阵列作为输入源的 IPOS 系

统;同时系统需要额外的 DC-DC 变换器实现单独的 MPPT 控制,导致总体成本增加。

本文提出一种适用于中低压直流配电系统的模块化多端口光伏直流变换器,实现分布式光伏阵列和光伏端、储能端和输出端的多端口功率协调控制。通过将各模块化光伏多端口直流变换器的输入端口与独立的光伏阵列、并联的输出端口和并行的双向端口连接以构建 LVDC-MVDC 母线进行构建中低压直流配电系统。提出的模块化多端口光伏直流变换器具有单独的 MPPT 控制,低电压应力以及与两级配电接口的能力。通过将 LVDC 作为变换器前后级的功率解耦总线,实现在不同工作模式下各端口的控制,确保中低压直流配电系统可靠高效运行。

2 基于模块化多端口光伏直流变换器直流电网系统架构

本文构建了高渗透分布式光伏发电通过直流变换器以多端口形式接入中低压两级直流配电系统,系统架构与典型场景示意如图 1 所示。该系统由光伏发电单元、储能单元、交流负荷、直流负荷、低压直流配电系统、中压直流配电系统及交流电网等组成,具有多种能源形式接入、就地消纳光伏、适应广泛的应用场景等技术特征,可用于研究分布式能源接入直流配电系统的集成优化技术,模拟高渗透率的新能源直流汇集系统,研究新能源直流并网系统交直流相互影响等,为新能源直流并网方案提供仿真条件。

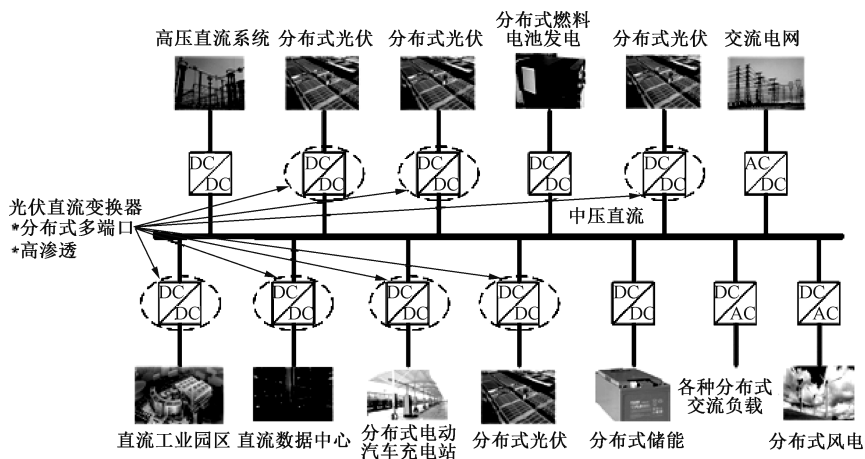


图 1 光伏多端口变换器接入中压直流配电系统

Fig.1 PV multi-port converter connected to medium voltage DC power distribution system

3 模块化多端口光伏直流变换器拓扑

基于对光伏发电波动特性并且综合应用场景进行分析,提出一种兼容光伏储能的模块化多端口直流变换器拓扑构架。该模块化多端口光伏直流变换器的拓扑结构及应用如图 2 所示。

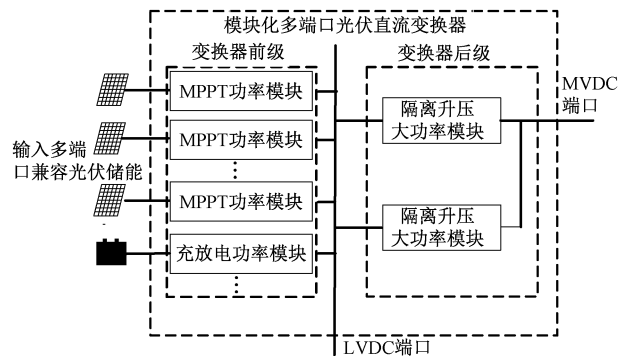


图2 模块化多端口光伏直流变换器的拓扑结构

Fig.2 Topology and application of modular multi-port photovoltaic DC-DC converter

模块化多端口光伏直流变换器是由多输入 MPPT 模块与双向隔离型升压大功率模块级联构成,在低压直流母线挂接一个储能电池用充放电功率模块。低压直流端口接于低压直流配电网,中压直流端口接于中压直流配电网。

模块化多端口光伏直流变换器具有的技术特征:支持低压和中压直流两级双端口同时配电,兼顾同时具有中压直流配电网和低压直流微电网的应用场景,自由配置所需要的功率模块数量和类型,构成不同的变换器类型;具备在线故障隔离能力,单模块故障不影响变换器正常工作,减少对配网系统的冲击或扰动;冗余储能模块,可提高光伏发电系统功率稳定性,减少光伏发电功率波动对 MVDC 配网的干扰;光伏能量波动可以在前级光伏-储能端口间直接平抑,无需 MVDC 中间环节,效率更高;孤岛模式下光伏端仍可借助储能端的稳压能力继续运行在最大功率点跟踪模式下,最大限度提高光伏能量的利用率;可在不同应用场景同时实现本地低压直流配电微网和区域中压直流配电网,优化配电。

光伏多端口直流变换器可应用于数据中心、住宅小区、商业大厦、工厂等场景。低压直流(LVDC)端和中压直流(MVDC)端形成两级配用电网,就地优先消纳光伏,如图 3 所示。

以模块化多端口光伏直流变换器在数据中心应用场景为例,具体说明所提出的模块化多端口直流

变换器对大规模分布式光伏接入中低压的消纳能力,如图 4 所示。分布式光伏接入多端口光伏直流变换器的输入端口,LVDC 接口接入低压直流配电微网,微网内燃料电池组、燃气发电机组及超级电容器等通过直流变换器接入 LVDC,联合光伏发电对直流数据中心的服务器负载进行供电,有效地平抑光伏发电功率的波动性和随机性,提升大规模分布式光伏接入的消纳能力,减小光伏弃光率。MVDC 接入中压直流配电网。作为备选方案,LVDC 后级可通过逆变器接入交流负荷,提高配电系统的灵活性。此外,应用于数据中心的光伏多端口直流变换器可以利用 MVDC 供电,也可以使用光伏发电系统和储能系统,同时兼顾了系统效率和系统可靠性。而且,储能系统仅在需要时工作,不受 MVDC 直流总线的影响。光伏多端口直流变换器模块可以通过 LVDC 直流总线共享储能系统,提高可靠性。

4 模块化多端口直流变换器控制策略分析

4.1 模块化多端口直流变换器拓扑分析

4.1.1 变换器前级拓扑分析

光伏阵列采用的变换器通常包含 Buck 型、Boost 型以及 Buck-Boost 型等,考虑电路处于输入端处于断续模式下储能电容的设计因素,选取具有优势的 Boost 型变换电路;考虑储能系统充放电以及电压、电流应力特性,储能接口单元采用双向半桥 DC-DC 变换器,其电路图如 5 所示。

4.1.2 变换器后级拓扑分析

隔离双向 DC-DC 变换器常见的主要有正激双向 DC-DC 变换器、反激双向 DC-DC 变换器、推挽双向 DC-DC 变换器、半桥及全桥双向 DC-DC 变换器。相对于上述变换器开关应力、应用场合等限制,双有源桥(Dual Active Bridge, DAB)DC-DC 变换器更适应于大功率场合,控制灵活等特点,受到广泛关注。双有源桥 DC-DC 变换器电路图如图 6 所示。

4.2 系统能量管理

分层控制^[25,26]为直流微电网系统中的常用控制方法之一。其主要思想是将直流母线电压划分为若干等级,通过检测母线电压判定系统的运行层以控制光伏发电单元、储能单元和负荷单元的运行模式。针对图 3 所示的基于模块化多端口直流变换器的直流配电系统该策略同样适用。所述两级直流配电系统中, P_{pv} 为光伏发电功率, P_{load} 为负载功率, V_{dcL_ref} 为不同工作模式下低压直流母线参考电压,

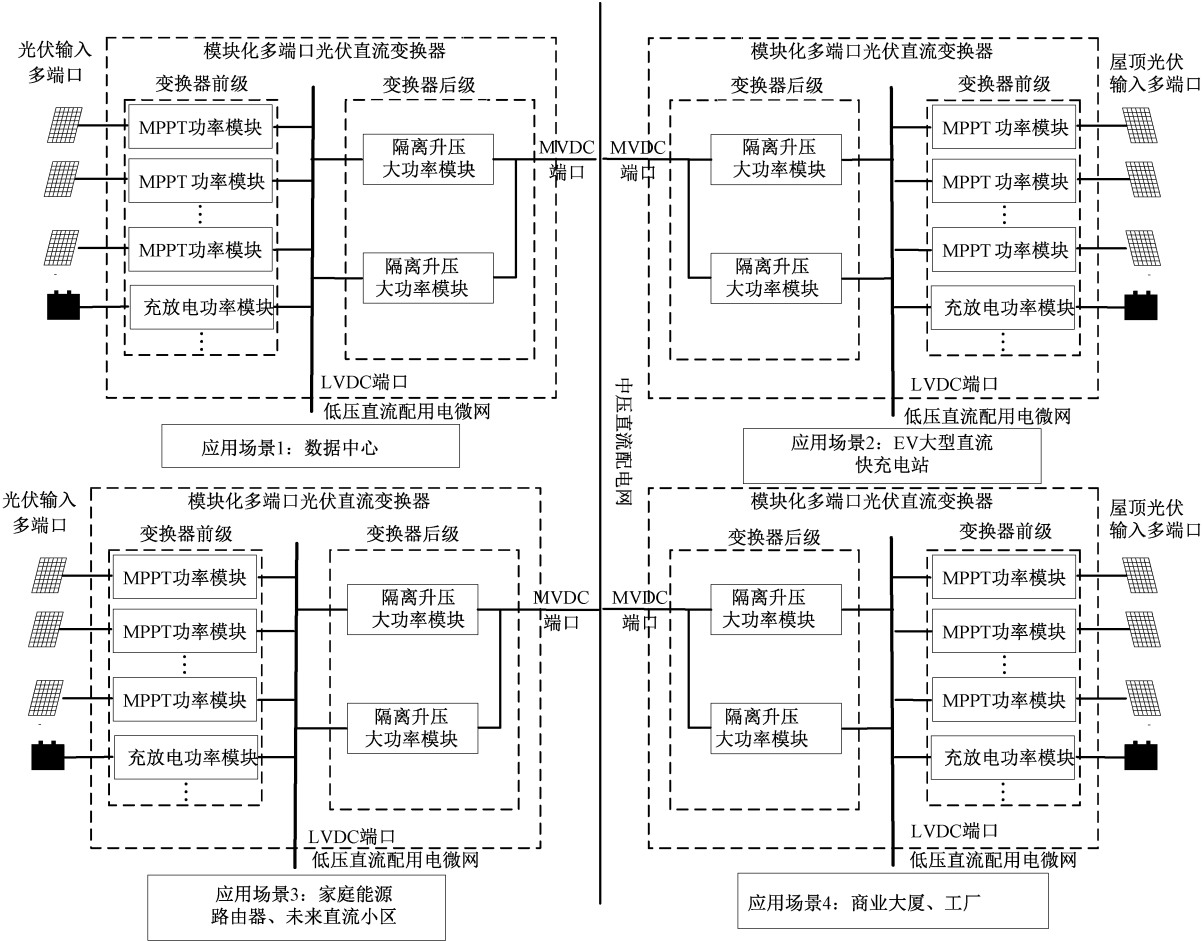


图 3 模块化多端口光伏直流变换器典型应用场景

Fig.3 Typical application scenario of modular multi-port photovoltaic DC-DC converter

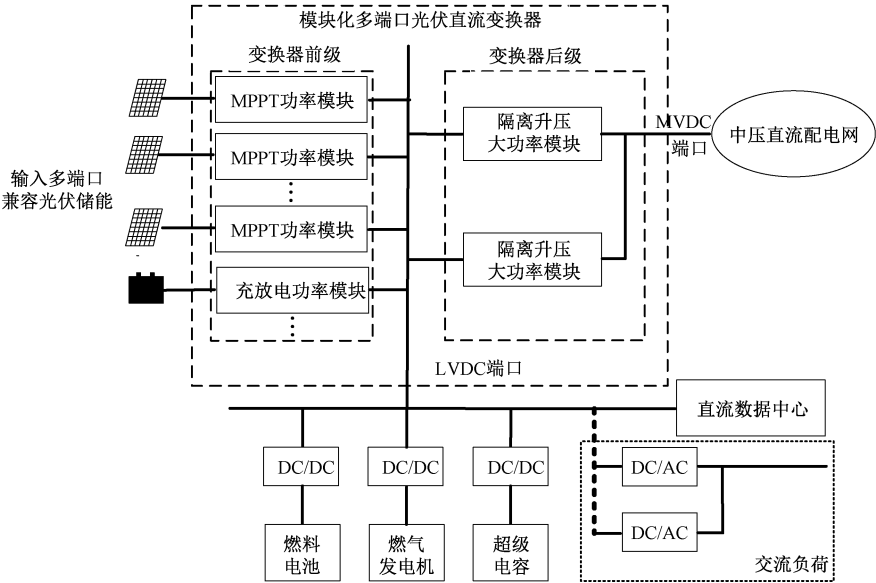


图 4 模块化多端口光伏直流变换器在数据中心的应用

Fig.4 Application of modular multi-port photovoltaic DC-DC converter in data center

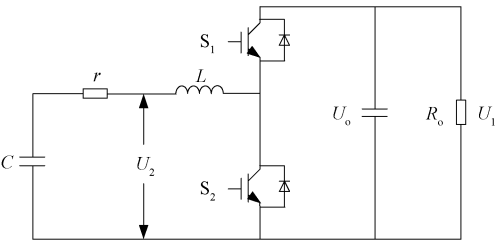


图5 双向半桥 DC-DC 变换器电路图

Fig.5 Circuit of bidirectional half bridge DC-DC converter

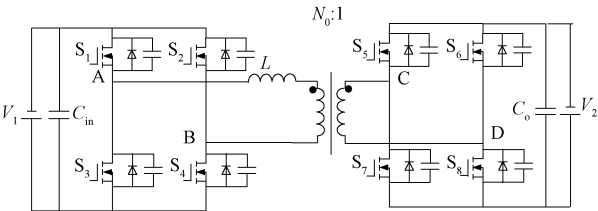


图6 双有源桥 DC-DC 变换器电路图

Fig.6 Circuit of dual active bridge DC-DC converter

V_{dc_n} 为低压直流母线标称电压。

提出的能量管理方案可将系统运行划分为 4 种工作模式：

(1)工作模式 1: $P_{pv} > P_{load}$, $V_{dc_ref} = V_{dc_n}$, 系统并网运行,变换器后级升压接入 MVDC 端口,功率流向 MVDC 端口。变换器前级以 MPPT 方式运行,后级控制 LVDC 端口恒压输出。

(2)工作模式 2: $P_{pv} < P_{load}$, $V_{dc_ref} < V_{dc_n}$, 系统并网运行,变换器后级降压由 MVDC 接入,功率流从 MVDC 端口流向 LVDC 端口。变换器前级以 MPPT 方式运行,后级控制 LVDC 恒压输出。

(3)工作模式 3: $P_{pv} > P_{load}$, $V_{dc_ref} > V_{dc_n}$ 系统孤岛运行,储能控制 LVDC 端口输出稳压,变换器前级以 MPPT 方式运行,控制 LVDC 端口输出恒压,后级 MVDC 端口输出恒压。

(4)工作模式 4: $P_{pv} > P_{load}$, $V_{dc_ref} < V_{dc_n}$, 系统孤岛运行,储能待机,变换器前级控制 LVDC 端口输出恒压,后级 MVDC 端口输出恒压。

各端口变换器均对相应的直流母线电压进行采样,并根据直流母线电压设置一定的阈值^[27,28]。本文设置相邻工作模式的直流总线电压差值 5%。

4.3 模块化多端口直流变换器控制方式分析

在不同系统工作模式下,模块化多端口直流变换器的控制如表 1 所示。由表 1 可知,LVDC 作为变换器前后级的功率解耦总线。当系统处于工作模式 1 和模式 2 时,变换器前级中储能接口变换器以

电压源工作并控制 LVDC 总线电压,光伏接口变换器均以电流源工作,变换器后级控制 LVDC 总线电压,作为电流源接入 MVDC 总线;当系统处于工作模式 3 时,变换器前级中光伏接口变换器和储能接口变换器均以电流源工作,变换器后级以电压源工作并控制 MVDC 总线电压;当系统处于工作模式 4 时,储能待机,变换器前级中光伏接口变换器以电压源工作并控制 LVDC 总线电压。变换器后级以电压源工作并控制 MVDC 总线电压。对于系统在任意时刻,至少存在一级变换器以电压源工作并控制 LVDC 和 MVDC 电压,其余变换器均以电流源形式工作。各级变换器的运行状态可实现电压源型系统的稳定可靠运行。

表 1 不同工作模式下直流变换器控制方式

Tab.1 Control mode of DC-DC converter under different system operation modes

直流控制模式		前级	后级
并网工作模式	储能待机	MPPT 模式, 作为电流源接入 LVDC	控制 LVDC 总线, 作为电流源接入 MVDC
孤岛工作模式	储能装置控制 LVDC	MPPT 模式, 作为电流源接入 LVDC	控制 MVDC 总线, 作为电流源接入 LVDC
	储能待机	电压模式	电压模式

4.4 模块化多端口直流变换器各端口控制策略

4.4.1 变换器前级控制

变换器前级中光伏接口变换器控制策略如图 7 所示。并联型分布式光伏 MPPT 架构中,由于每个变换器前级模块并联,其输出电压等于直流母线电压,输出电压的参考值为恒定值,控制电路相同且独立。包含两种运行模式: MPPT 模式、降功率稳压模式。根据不同运行模式下选择控制信号,最终输出相应控制环路下的开关管的占空比。

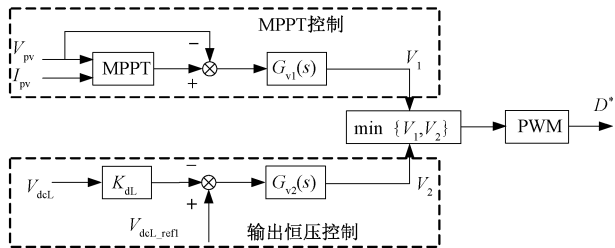


图7 光伏接口变换器控制策略框图

Fig.7 Control strategy block diagram of PV converter

图 7 中, V_{pv} 、 I_{pv} 分别为光伏阵列输出电压和输

出电流; V_{dcL} 、 $V_{\text{dcL_ref1}}$ 分别为 LVDC 母线电压和系统运行参考电压值; K_{dl} 为 LVDC 电压反馈系数; $G_{\text{v1}}(s)$ 、 $G_{\text{v2}}(s)$ 分别为输出 MPPT 控制和输出恒压控制的 PI 控制器; V_1 和 V_2 分别为输出控制电压信号; D^* 为变换器占空比。当系统并网运行时, V_{dcL} 高

于 400 V,变换器前级以 MPPT 方式运行;当系统孤岛运行,当 $P_{\text{pv}} > P_{\text{load}}$ 时, V_{dcL} 上升至最大值时,变换器前级中光伏接口变换器由 MPPT 控制模式转为输出恒压控制模式,控制 V_{dcL} 并使得 $P_{\text{pv}} = P_{\text{load}}$ 。储能接口变换器控制策略如图 8 所示。

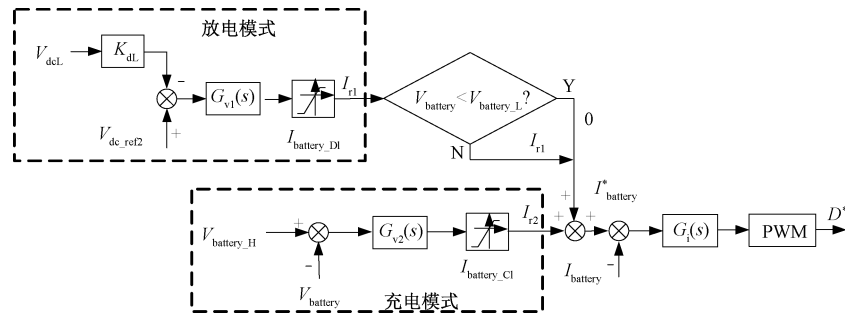


图 8 储能接口变换器控制策略框图

Fig.8 Control strategy block diagram of energy storage converter

图 8 中, V_{battery} 为蓄电池电压; $V_{\text{battery_H}}$ 、 $V_{\text{battery_L}}$ 分别为蓄电池电压的上限和下限,相应 $\text{SOC} = 90\%$ 和 $\text{SOC} = 20\%$; $G_{\text{v1}}(s)$ 、 $G_{\text{v2}}(s)$ 分别为蓄电池放电模式下输出电流控制和充电模式下输出电流控制的 PI 控制器; $I_{\text{battery_CI}}$ 和 $I_{\text{battery_DI}}$ 分别为蓄电池最大充电和放电电流; I_{battery}^* 和 I_{battery} 分别为蓄电池侧电流参考和反馈信号, D^* 为占空比。蓄电池充放电电流由 I_{battery}^* 值决定:当 I_{battery}^* 取正值时,蓄电池处于放电模式;反之,当 I_{battery}^* 取负值时,蓄电池处于充电模式。

4.4.2 变换器后级控制

变换器后级中双有源桥变换器控制策略如图 9 所示。图 9 中, V_{dcL} 、 V_{dcM} 分别为 LVDC 母线电压和 MVDC 母线电压; K_{dl} 、 K_{dM} 分别为 LVDC 电压反馈系数和 MVDC 电压反馈系数; $V_{\text{dcL_ref1}}$ 、 $V_{\text{dcM_ref1}}$ 为 LVDC 参考电压和 MVDC 参考电压; $G_{\text{v1}}(s)$ 、 $G_{\text{v2}}(s)$ 分别为输出 LVDC 输出恒压控制和 MVDC 输出恒压控制的 PI 控制器; V_1 和 V_2 分别为输出控制电压信号; D^* 为变换器占空比。

5 仿真结果

为了说明所提控制策略的有效性,文中在 MATLAB / Simulink 仿真软件中搭建基于模块化多端口直流变换器的两级直流配网系统。

变换器前级中,光伏单元的每个电源模块由光伏阵列、Boost 变换器以及相应的控制电路组成,其中控制电路设计包括三个环路,MPPT 控制(占空比扰动观察法)环路、限压控制环路与降功率稳压控制环路;储能单元由蓄电池、双向半桥 DC-DC 变

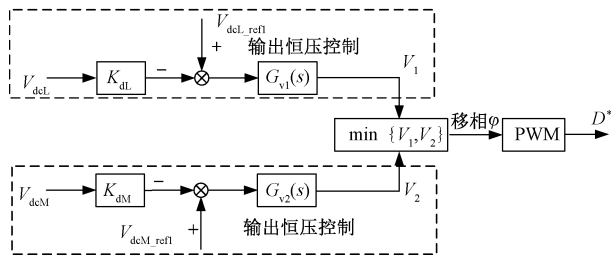


图 9 双有源桥变换器控制策略框图

Fig.9 Control strategy block diagram of dual active bridge converter

换器以及稳压限流控制电路组成;负荷单元由电阻构成。变换器后级中,IPOS 模块由三个 DAB 变换器构成。

直流配电系统中模块化多端口直流变换器中子模块的仿真参数如表 2 所示。

表 2 直流变换器仿真参数

Tab.2 Simulation parameters of DC/DC converters

参数设置	输入电压/V	输出电压/V	变压器漏感/ μH	最大输入功率/kW	开关频率/kHz
前级光伏变换器	150~250	400	—	3.1	10
前级储能变换器	200	400	—	1.9	10
后级变换器	400	1000	670	3	10

注:表 2 中“—”为不包含变压器漏感。

图 10 为工作模式 1 的仿真结果。0~0.05s,光伏发电单元开始工作,能量流向 LVDC 端口与 MVDC 端口,LVDC 总线电压上升,光伏单元发出的

能量上升;0.05~0.3s,由于MVDC的控制作用,LVDC总线电压变化趋于稳定400V;光伏发电单元以MPPT方式运行,储能单元处于待机状态。

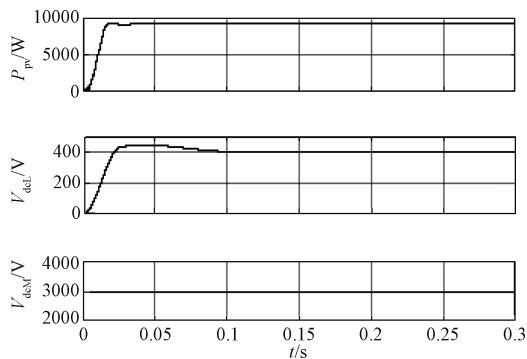


图10 工作模式1仿真结果

Fig.10 Simulation results of operating mode 1

图11为工作模式2的仿真结果。0~0.05s,光伏发电单元开始工作,能量流向LVDC端口,MVDC流向LVDC端口,LVDC总线电压上升,光伏单元发出的能量上升;0.05~0.3s,由于MVDC的控制作用,LVDC总线电压变化趋于稳定400V;光伏发电单元以MPPT方式运行,储能单元处于待机状态。

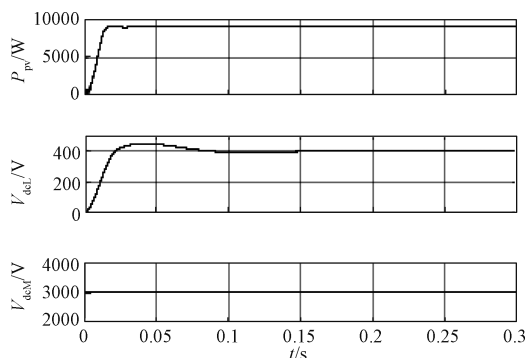


图11 工作模式2仿真结果

Fig.11 Simulation results of operating mode 2

图12为工作模式3的仿真结果。0~0.05s,光伏发电单元开始工作,能量流向LVDC端口与MVDC端口,LVDC总线电压上升,光伏发电单元输出的能量上升;0.05~0.3s,由于储能单元和后级变换器的控制作用,LVDC总线电压变化趋于稳定400V,MVDC总线电压趋于稳定3000V;光伏发电单元以MPPT方式运行,储能单元未达到SOC上限,处于充电状态。

图13为工作模式4的仿真结果。0~0.3s,光伏发电单元开始工作,能量流向LVDC端口与MVDC端口,LVDC总线电压上升;0.3~0.7s,由于

光伏单元和后级变换器的控制作用,LVDC总线电压变化趋于稳定400V,MVDC总线电压趋于稳定3000V;光伏发电单元以降功率恒压方式运行,储能单元处于待机状态。

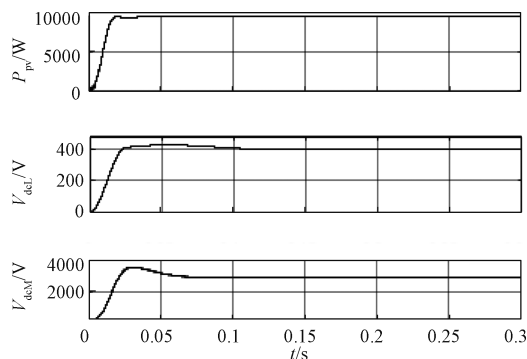


图12 工作模式3仿真结果

Fig.12 Simulation results of operating mode 3

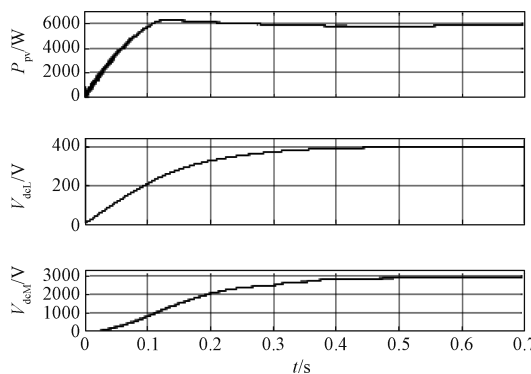


图13 工作模式4仿真结果

Fig.13 Simulation results of operating mode 4

6 实验验证

为验证基于模块化多端口直流变换器应用于两级直流配电系统模型及控制策略有效性,对系统的运行进行分析验证。考虑系统并/离网4种不同工作模式,从稳态和动态进行实验验证。由于篇幅所限,以下仅给出系统不同工作模式内的实验波形。

图14为系统在4种不同工作模式的实验波形。由图14(a)和图14(b)的实验波形可知,系统处于并网工作模式,变换器前级中,光伏发电单元以MPPT方式工作,变换器后级维持LVDC总线电压稳定。当LVDC总线接入的负荷容量不同时,变换器后级可实现双向功率流动;由图14(c)的实验波形可知,系统处于孤岛工作模式,光伏发电单元以MPPT方式工作,储能装置控制LVDC总线电压稳定,后级控制MVDC总线电压稳定;由图14(d)的

实验波形可知,系统处于孤岛工作模式,储能待机,变换器前级控制 LVDC 总线电压稳定,变换器后级控制 MVDC 总线电压稳定。实验结果验证了系统功率解耦控制策略的有效性。

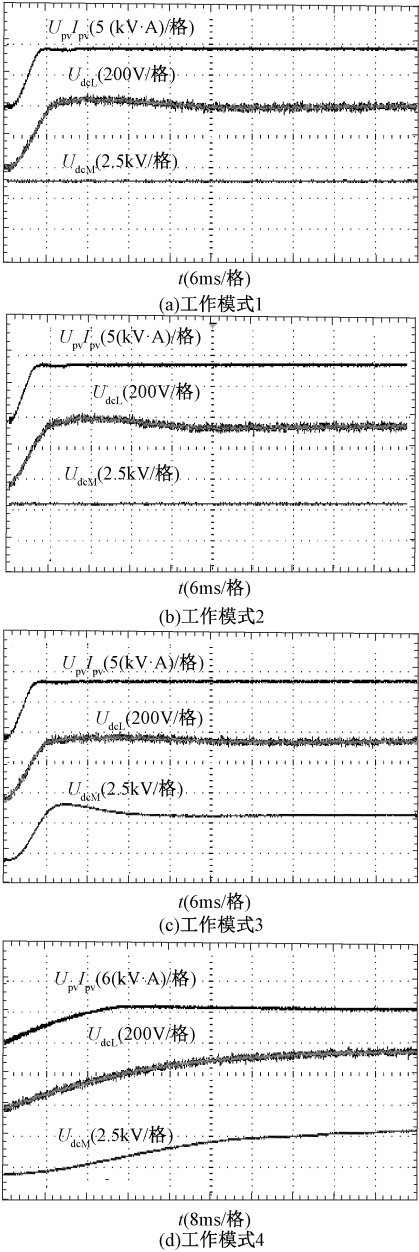


图 14 系统在不同工作模式下的实验波形
Fig.14 Experimental waveforms of the system in different operating modes

7 结 论

本文提出一种模块化多端口直流变换器拓扑结构,通过模块化设计,具有配置灵活、冗余性强、稳定性好、光伏电能利用率和配电效率高、故障易隔离的

特点;同时,由多个变换器构成的多端口直流配电系统,具有中低压两级配电母线,更好地满足了不同电压等级、功率等级的应用需求;提出的将 LVDC 作为变换器前后级功率解耦总线的控制策略,实现离并网条件下光伏端、储能端和输出端的多端口功率协调控制,对光伏多端口直流配电系统的研究与推广具有指导意义。

参考文献 (References):

[1] Rojas C A, Kouro S, Perez M A, et al. DC-DC MMC for HVdc grid interface of utility-scale photovoltaic conversion systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (1): 352-362.

[2] Romero-Cadaval E, Spagnuolo G, Garcia Franquelo L G, et al. Grid-connected photovoltaic generation plants: Components and operation [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7 (3): 6-20.

[3] Kouro S, Leon J I, Vinnikov D. Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2015, 9 (1): 47-61.

[4] Lu D, Fakham H, Zhou T, et al. Application of Petri nets for the energy management of a photovoltaic based power station including storage units [J]. Renewable Energy, 2010, 35 (6): 1117-1124.

[5] Zhang L, Gao F, Li N, et al. Interlinking modular multi-level converter of hybrid ac-dc distribution system with integrated battery energy storage [A]. 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Montreal, Canada, 2015. 70-77.

[6] 孔力,裴玮,叶华,等 (Kong Li, Pei Wei, Ye Hua, et al.). 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究 (Review of pattern, control and stability for hybrid AC/DC distribution power systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 1-10.

[7] Riffonneau Y, Bacha S, Barruel F, et al. Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2 (3): 309-320.

[8] Liu L M, Li H, Xue Y S, et al. Decoupled active and reactive power control for large-scale grid-connected photovoltaic systems using cascaded modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1): 176-187.

[9] Liu L M, Li H, Xue Y S, et al. Reactive power compensation and optimization strategy for grid-interactive casca-

- ded photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (1): 188-202.
- [10] Wang Z, Li H. An integrated three-port bidirectional DC-DC converter for PV application on a DC distribution system [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2013, 28 (10): 4612-4624.
- [11] Qin S B, Cady S T, Dominguez-Garcia A D, et al. A distributed approach to maximum power point tracking for photovoltaic submodule differential power processing [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (4): 2024-2040.
- [12] Olalla C, Clement D, Rodriguez M, et al. Architectures and control of submodule integrated dc-dc converters for photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (6): 2980-2997.
- [13] Bell R, Pilawa-Podgurski R C N. Decoupled and distributed maximum power point tracking of series-connected photovoltaic submodules using differential power processing [J]. IEEE Journal of Emerging Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3 (4): 881-891.
- [14] Bratcu A I, Munteanu I, Bacha S, et al. Cascaded DC-DC converter photovoltaic systems: Power optimization issues [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2): 403-411.
- [15] Kadri R, Gaubert J P, Champenois G. Nondissipative string current diverter for solving the cascaded DC-DC converter connection problem in photovoltaic power generation system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (3): 1249-1258.
- [16] Vighetti S, Ferrieux J P, Lembeye Y. Optimization and design of a cascaded DC/DC converter devoted to grid-connected photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (4): 2018-2027.
- [17] Pilawa-Podgurski R C N, Perreault D J. Submodule integrated distributed maximum power point tracking for solar photovoltaic applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (6): 2957-2967.
- [18] Femia N, Lisi G, Petrone G, et al. Distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: novel approach and system analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55 (7): 2610-2621.
- [19] Liu Y, Abu-Rub H, Ge B. Front-end isolated quasi-Z source DC-DC converter modules in series for high-power photovoltaic systems - Part I: Configuration, operation, and evaluation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (1): 347-358.
- [20] Lian Y, Adam G, Holliday D, et al. Modular input-parallel output-series DC/DC converter control with fault detection and redundancy [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10 (6): 1361-1369.
- [21] Chen W, Wang G. Decentralized voltage-sharing control strategy for fully modular input-series-output-series system with improved voltage regulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (5): 2777-2787.
- [22] Chen W, Wang G, Ruan X, et al. Wireless input voltage sharing control strategy for input-series output-parallel (ISOP) system based on positive output-voltage gradient method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (11): 6022-6030.
- [23] Lu Y, Sun K, Wu H, et al. A three-port converter based distributed dc grid connected PV system with autonomous output voltage sharing control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (1): 325-339.
- [24] 董晓峰, 吴红飞, 陆杨军, 等 (Dong Xiaofeng, Wu Hongfei, Lu Yangjun, et al.). 模块化光伏直流并网系统分布式自主控制策略 (Distributed autonomous control strategy for modular photovoltaic DC grid-connected system) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2018, 42 (19): 126-135.
- [25] 王红艳, 周国华, 徐顺刚, 等 (Wang Hongyan, Zhou Guohua, Xu Shungang, et al.). 基于串联型分布式MPPT架构的直流微网系统无缝切换控制策略 (Seamless switching control strategy of DC microgrid based on cascaded distributed MPPT architecture) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2019, 39 (2): 188-195, 203.
- [26] 寇凌峰, 李洋, 吴鸣, 等 (Kou Lingfeng, Li Yang, Wu Ming, et al.). 分布式微电网电压恢复协调控制策略 (Coordinated control strategy for voltage recovery in distributed microgrids) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 65-72.
- [27] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等 (Zhang Li, Sun Kai, Wu Tianjin, et al.). 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理 (Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (2): 248-254.
- [28] 杜少飞, 谢文超, 朱永强, 等 (Du Shaofei, Xie Wen-chao, Zhu Yongqiang, et al.). 并网型直流微电网主动协调控制方法研究 (Research on active coordination control method for grid-connected DC microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (6): 30-38.

Research on PV DC-DC converter and control strategy for two-stage DC power distribution system

HAO Li-dong¹, PAN Shang-zhi¹, JIANG Jian-bo¹, GONG Jin-wu¹,
LUO Hai-yun², KANG Peng-jv³, WANG Wen-cui²

- (1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
- 2. Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710065, China;
- 3. Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: The system parameters requirement of the photovoltaic (PV) DC converter are analyzed and determined, combined with the requirements of maximum power tracking, conversion efficiency, system power distribution efficiency and reliability for DC distribution system with high permeability photovoltaic access. The topology is studied to determine the system architecture scheme, which is easy to expand, configurable, and to fault isolation, and has wide distributed access capability, suitable for different power levels and application scenarios. The multi-port power coordinated control technology of the photovoltaic terminal, energy storage and output terminal and the energy control strategy of the LVDC and MVDC two-level DC bus are given based on power decoupling bus with LVDC as the front and rear stage of the converter. It has guiding significance for the research and promotion of photovoltaic multi-port DC power distribution system.

Key words: high permeability photovoltaic; DC distributed system; access capability; coordinated control technology; energy flow control