

基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统分析

贾祺¹, 赵彪², 严干贵¹, 宋强²

(1. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012; 2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 为了克服柔性中压直流配电网工频方案中变压器体积大、重量大、噪音大、控制不够灵活等问题, 提出一种基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统。该系统中直流配电母线不仅包括中压直流母线, 还包括低压直流母线; 中低压直流母线之间通过直流变压器进行连接; 低压直流母线用于接入各类分布式电源。该系统中高频链直流变压器的使用不仅实现了不同电压等级直流母线间的电压变换、能量管理, 还可以有效提高系统功率密度。介绍了中压柔性直流配电系统架构, 给出了高频链直流变压器以及其它典型换流器的设计和分析, 并对直流配电系统的工作模式和控制器进行了设计。最后, 搭建了仿真平台, 验证了系统的有效性。

关键词: 直流配电网; 中压; DAB; 直流变压器; 高频链

Analysis of flexible medium voltage DC power distribution system based on high-frequency-link DC solid state transformer

JIA Qi¹, ZHAO Biao², YAN Gangui¹, SONG Qiang²

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the transformer's problems such as huge volume, heavy weight, large noise, and control is not flexible enough in the power frequency scheme of the flexible medium voltage DC power distribution system, a flexible medium voltage DC power distribution system based on high-frequency link DC solid state transformer is presented. The system of DC power distribution buses include not only medium voltage DC bus, but also low voltage DC bus; the medium and low voltage DC buses are connected via a DC solid state transformer; low voltage DC bus is used for access to all kinds of distributed power supply. In this system, the use of high frequency link DC solid state transformer not only realizes the voltage transformation, energy management between different voltage levels, but also effectively improves the system power density. The medium voltage flexible DC distribution system architecture is introduced, the high-frequency link DC solid state transformer and other typical converters are designed and analyzed, and the working mode of DC power distribution system and a controller are designed. Finally, the simulation platform is built to verify the effectiveness of the system.

This work is supported by Projects of International Cooperation and Exchanges NSFC (No. 512111038).

Key words: DC power distribution; medium voltage; DAB; DC solid state transformer; high-frequency-link

0 引言

20 世纪 70 年代末的能源危机爆发, 环境污染和能源短缺等问题的出现, 推动了分布式电源的发展, 而大多数分布式电源产生的电能均为直流电。另外, 从目前的负荷发展来看, 与计算机相关的数据中心、计算中心、网络中心等直流负荷的广泛应

用已经成为了这个时代的标志, 文献[1]统计了美国楼宇用电情况, 指出美国楼宇用电总量的 30% 在供上述设备使用前需要经过换流设备转化成直流电, 并且该比重在未来的 5 年内将达到 80%。若采用直流配电网来接入这些直流分布式电源和直流负荷, 可以节省大量的换流环节, 减小体积, 降低成本和损耗^[2-3]。综上所述, 分布式电源以及直流负荷的发展都推动了直流配电网的发展。另外, 直流配电网本身具有线路成本低、输电损耗小、供电可靠性高、

环保等优势, 相比于交流配电网, 具有很大的发展前景。

截止到目前, 美国、欧洲、日本等各个国家和地区都开展了直流配电网的研究。但是大多数研究多集中在低压直流微电网方面, 中压配电网主要以交流为主。并且, 目前针对直流微电网接入更高电压等级的交流配电网也主要存在两种方案: 工频方案和高频方案。

对于工频方案, 就是利用工频变压器实现电气隔离与电压匹配。低压母线需要经过 DC/AC 变换器将低压直流变成低压交流, 然后经过工频隔离变压器与中压配电网连接。目前, 这种方案是研究直流配电网中应用最广泛的一种方案。文献[4]利用储能的下垂特性研究微电网的协调控制。文献[5]分析光伏、风电、储能构成的直流微电网运行特性, 总结系统运行模式, 提出整体协调控制策略。文献[6]根据功率流动的方向来划分系统的工作模式。文献[7]以风电直流微网为基础, 提出了电压分层协调控制策略。文献[8]以 DC/AC 变换器为研究对象, 分析了系统处于并网、孤岛, 切换运行三个模式下控制方法。这种方案虽然应用广泛, 但是工频变压器占地大、质量笨重并且噪声很大。

对于高频方案, 就是通过采用交流电力电子变压器来实现直流微电网与高压交流配网的连接, 如北卡大学提出的 FREEDM 系统^[9]。相比较工频方案, 虽然高频方案应用的比较少, 并且损耗相对较大, 但是可以有效解决工频方案中存在的体积大、重量大、噪音大、谐波含量高、控制不够灵活等问题。随着分布式电源等的大规模应用, 具有较大的应用潜力。

根据上述发展趋势和研究现状, 本文提出一种基于高频链直流变压器(DC solid state transformer, DCSST)的柔性中压直流配电系统, 其中压和低压母线均为直流, 高频链直流变压器作为中低压直流母线之间的关键环节以实现电压和功率的灵活控制和管理。文中给出了该中压柔性直流配电系统架构设计, 给出了高频链直流变压器以及其它典型换流器的设计和分析, 并对直流配电系统的工作模式和控制器进行了设计。最后, 搭建了仿真平台, 验证了系统的有效性。

1 柔性中压直流配电系统架构

本文提出的基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统架构如图 1 所示。中低压配电网和微电网均为直流, 并且通过高频链直流变压器相连。光伏发电、电池储能^[10-11]、交直流负荷等系统均通

过非隔离型 DC/DC 以及 AC/DC 变换器^[12-13]接入低压直流微电网^[14]。

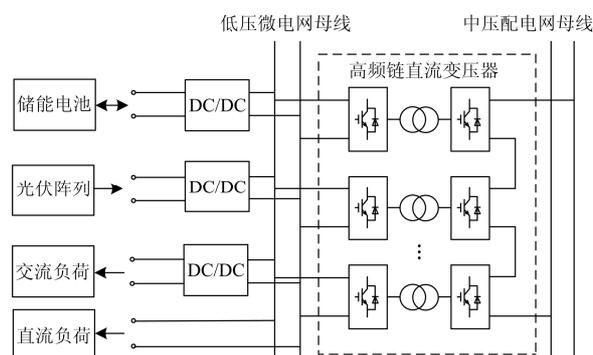


图 1 基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统

Fig. 1 DC power distribution system based on DCSST

图 1 中高频链直流变压器主要通过高频隔离变压器来提供电压匹配和电气隔离, 高频隔离变压器两侧均采用 AC/DC 变换来与中低压直流母线连接。相对交流电力电子变压器方案, 直流变压器具有更少的变换环节, 效率、功率密度以及可靠性均有效提高。

中压直流配电系统正常运行时, 中压直流母线可以通过直流变压器向交、直流负荷供电; 直流微电网也可以通过直流变压器向配电网馈电。系统故障时, 光伏、储能系统等可以通过低压直流微电网、也可以通过中压直流配电网运行在孤岛模式, 分别给低压直流母线或中压直流母线系统上的负荷供电。

另外, 柔性中压直流配电相对于单纯的低压直流微电网来说, 可以为大容量的光伏电站、储能电站以及交、直流微电网提供直流并网接口, 节省大量的变流环节, 节约成本, 降低损耗。而相对于高压直流输电来说, 可以通过直流变压器连接中压母线与直流输电网, 为高压直流输电网提供配电接口。

2 高频链直流变压器特性分析

2.1 双主动全桥变换器

本文中高频链直流变压器主要采用双主动全桥变换器(Dual Active Bridge, DAB)^[15-17]级联形式, 不仅能实现电压变换和电气隔离, 同时能量具有双向性。典型的单相 DAB 拓扑结构如图 2 所示, 其主要由两个全桥变换器、两个直流电容、一个辅助电感和一个高频变压器构成组成。由于 DAB 具有模块化对称结构、双向传输功率能力、动作响应快、软开关易实现等优点, 近几年受到越来越多的关注。

图 3 为 DAB 的工作原理图, 本文采用单移相控制。其中: u_{h1} 和 u_{h2} 为 DAB 两侧全桥变换器的

交流端电压； i_L 为全桥变换器交流端电感电流； T_{hs} 为半个周期； D 为移相比。电感电流 i_L 可以表示为

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{u_{h1}(t) - u_{h2}(t)}{L} \quad (1)$$

稳态下，流过电感的平均电流在一个开关周期内为零，并且传输功率可以表示为

$$P_{DAB} = \frac{nU_1U_2}{2f_sL} D(1-D) \quad (2)$$

式中： n 为变压器变比； f_s 为开关频率。通过式(2)可以看出调节移相比 D 就可以调节 DAB 功率流动的大小和方向，进而也可以调节输出电压的大小。

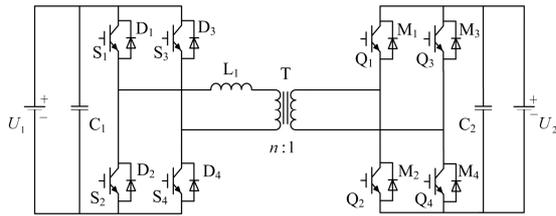


图 2 双主动全桥变换器拓扑结构

Fig. 2 Topology of DAB

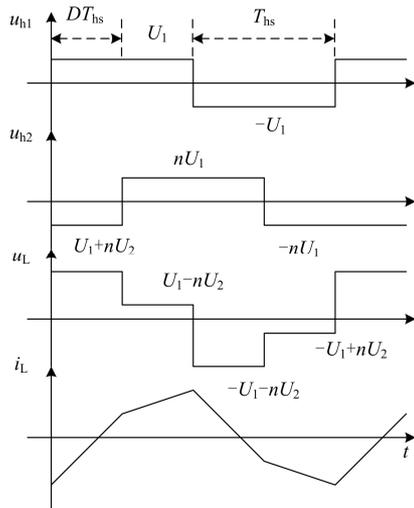


图 3 双主动全桥变压器控制原理

Fig. 3 Control principle of DAB

2.2 高频链直流变压器

以 DAB 为基本单元的高频链直流变压器如图 4 所示。多个完全相同的 DAB 在高压端串联接入中压直流配电网，在低压端并联接入低压直流微电网。图 4 中： U_{MVDC} 和 U_{LVDC} 分别为中压和低压母线电压； I_{MVi} 和 I_{LVi} 分别为各 DAB 单元在中压端和低压端的平均电流； U_{MVi} 和 U_{LVi} 为各 DAB 单元在中压端和低压端的平均电压，其中： $i=1, 2, \dots, n$ 。

从图 4 中可以看出，高频链直流变压器中，各

DAB 单元在串联侧电流相等，并联侧电压相等，并且直流变压器传输功率为各个 DAB 单元传输功率之和，即

$$P_{DCSST} = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (3)$$

式中， P_{DCSST} 为直流变压器传输功率。由于各 DAB 参数和控制方法一致，可得

$$P_{DCSST} = \frac{nU_{MVDC}U_{LVDC}}{2f_sL} D(1-D) \quad (4)$$

比较式(2)、式(4)可以看出，直流变压器与 DAB 传输功率基本一致，主要区别在于直流变压器中压端电压是各个 DAB 单元中压端串联电压之和。

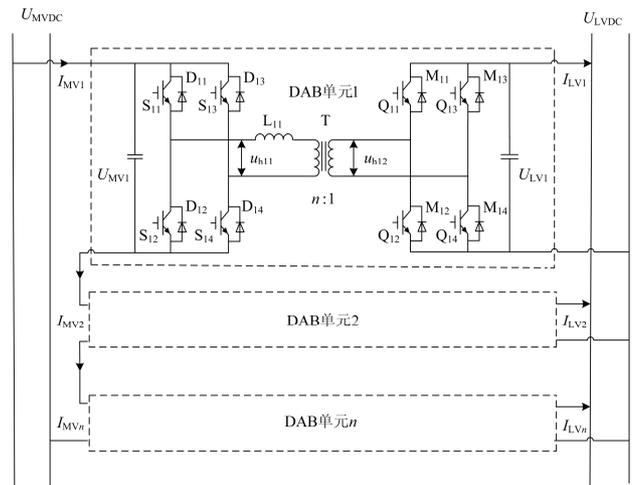


图 4 直流变压器拓扑结构

Fig. 4 Topology of DCSST

对于高频链直流变压器的控制，不仅要对各 DAB 单元进行控制，同时还有实现各个 DAB 单元在中压端的电压平衡和低压端的电流平衡。DAB 的传输功率在输入端与输出端相等，即

$$P_i = U_{MVi}I_{MVi} = U_{LVi}I_{LVi} \quad (5)$$

根据前面分析可得

$$U_{MV1} = U_{MV2} = \dots = U_{MVn} \Leftrightarrow I_{LV1} = I_{LV2} = \dots = I_{LVn} \quad (6)$$

由式(6)可以得到，电压平衡与电流平衡等价。

因此，直流变压器只需要对电压或者电流平衡进行控制。

2.3 其他典型接口变换器

光伏、储能的非隔离型 DC/DC 变流器^[18-19]由 Boost/Buck 变流器组成，其拓扑结构如图 5 所示。其中： U_1 为储能电池电压或者光伏出口电压； U_2 为低压母线电压。

当功率由电源流向母线时，变换器运行在 Boost 模式；当功率由母线流向电源时，变换器运行在 Buck 模式。

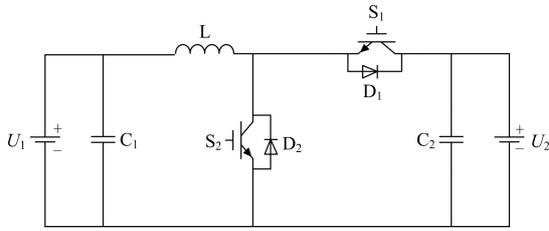


图 5 Boost-Buck 变换器拓扑结构

Fig. 5 Topology of Boost-Buck

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{1-d} \quad (7)$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{d} \quad (8)$$

式(7)为 Boost 模式下电压关系, 式(8)为 Buck 模式下电压关系, 其中, d 为占空比。

对于低压母线接入交流负荷, 通常采用 DC/AC 变换器, 其拓扑结构如图 6 所示, U_{DC} 为 DC/AC 直流侧电压, U_{AB} 为交流侧电压, i_o 为 DC/AC 输出电流。

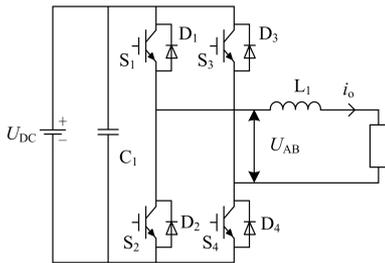


图 6 DC/AC 变换器拓扑结构

Fig. 6 Topology of DC/AC

DC/AC 变换器交流输出端可以连接负荷, 也可以连接电网, 并且 U_{AB} 的幅值和相位是可控的, 通过控制 U_{AB} 的幅值和相位便可以控制电感两端的电压, 进一步可以控制 i_o 的幅值和相位, 实现功率的双向传输。本文中 DC/AC 变换器主要用来驱动交流负荷, 并选择 DC/AC 工作在功率因数为 1 处运行。

3 柔性中压直流配电网工作模式与控制器设计

3.1 柔性中压直流配电网工作模式设计

直流变压器作为直流配电系统的核心部分, 可以根据它的工作模式来确定系统的工作模式, 因此设计为三种工作模式, 并且各个模式之间可以相互切换。

1) 中压模式

低压母线电压固定, 当中压配电母线侧异常,

分布式电源正常工作时, 为了保证中压母线侧负荷供电, 直流变压器控制中压母线, 分布式电源通过直流变压器向中压母线侧负荷供电。

2) 低压模式

中压母线固定, 低压母线由直流变压器控制。该模式下, 中压母线可以通过直流变压器向低压侧负荷供电, 低压侧分布式电源也可以通过直流变压器向中压母线侧馈电。

3) 功率模式

在功率模式中, 中低压母线均固定, 直流变压器控制功率流动的大小和方向。

通过上面的分析可知, 在系统不同的工作模式下, 各部分变流器的工作状态也不同。各个部分控制器是相互独立的, 它们之间无信号的传递, 通过控制中低压母线电压的稳定即可控制系统的功率平衡, 维持系统的稳定运行。

3.2 双主动全桥变换器控制设计

作为高频链直流变压器的重要组成部分, DAB 典型的控制策略见图 7, 通常对于 DAB 的控制采用电压电流双闭环策略。母线电压的偏差经过 PI 控制器后作为电流内环的参考值 i_{ref} , 电流偏差经过控制器后得到移相角, 输入到脉宽调制单元得到驱动脉冲。

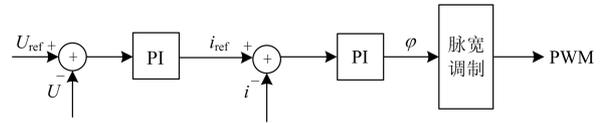


图 7 双主动全桥变换器控制设计

Fig. 7 Control strategy of DAB

3.3 高频链直流变压器控制设计

如前文所述, 对直流变压器的控制也就是对于每个 DAB 采用相同的控制方法, 最重要的是控制中压端各 DAB 串联单元电压平衡, 低压端各 DAB 并联单元电流平衡。

当系统工作中压模式时, 中压母线电压由直流变压器控制, 在此模式下, 直流变压器中每个 DAB 单元的控制策略与典型的 DAB 控制策略一致, 其控制策略见图 8(a)。各个 DAB 控制各自的中压端电压, 保证各自电压相等。外环中压母线电压误差经过 PI 后生成中压侧电流参考值, 电流误差经过 PI 后生成移相角, 输入 PWM 脉宽调制单元产生驱动脉冲。

当系统工作在低压模式时, 直流变压器不仅要控制低压母线电压, 还要控制中压端各个 DAB 电压的电压平衡, 其控制策略见图 8(b)。低压母线电

压误差经过 PI 后生成的值作为低压电流参考值,电压平衡控制器采集各 DAB 单元中压端电压 U_{MV_i} ,按公式(9)计算出平均电压 U_{lavr} , U_{lavr} 与 U_{MV_1} 之差作为 DAB 电流参考值的修正量。即低压电压控制器的输出与电流修正量之和作为 DAB 低压电流参考值。

$$U_{lavr} = \frac{U_{MV_1} + U_{MV_2} + \dots + U_{MV_n}}{n} \quad (9)$$

当系统工作在功率模式时,其控制策略见图 8(c)。该模式下,中低压母线电压均固定。根据指定传输功率求出的电流值与电压平衡控制器输出值之和作为 DAB 中压端电流参考值。

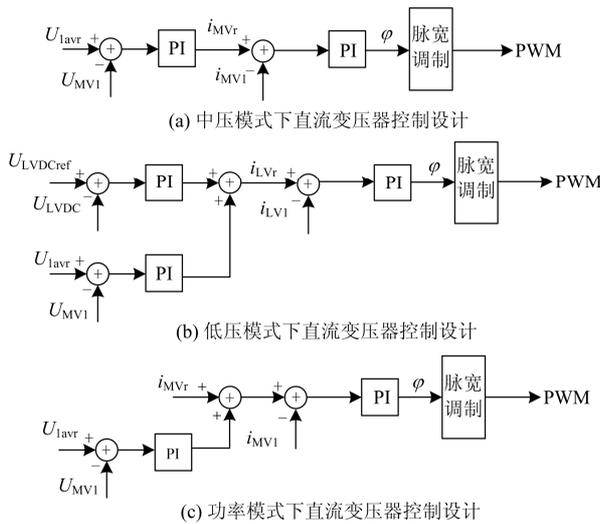


图 8 高频链直流变压器控制设计

Fig. 8 Control strategy of DCSST module

3.4 其他典型接口变换器控制设计

在图 1 所示的柔性中压直流配电网中,非隔离双向 DC/DC 主要用于光伏、储能的接入。光伏接口单元控制策略见图 9(a)。其中, i_{pV} 为光伏电流; V_{pV} 为光伏电压,经过 MPPT 控制器后产生电压参考值,电压误差经过 PI 放大后,再与三角载波比较法生成开关管门极脉冲。在该系统中光伏始终处于最大功率追踪模式。

当系统工作在低压模式时储能电池接口单元控制策略见图 9(b)。其中 i_{bref} 为电流充/放电电流参考值,此模式下,储能电池根据指定的功率值进行充放电,可计算出 i_{bref} ; i_b 为流过电感电流值,电流误差经过 PI 放大后,根据电流流向的不同确定工作开关管与占空比,再与三角载波比较法生成开关管门极脉冲。

当系统工作中压模式或者功率模式时,储能

电池接口单元电压电流双闭环控制策略见图 9(c)。其中 $U_{LVDCref}$ 为低压母线电压参考值;低压母线电压误差经过 PI 放大后生成内环电池电流参考值,内环电流误差经过 PI 放大后,根据电流流向的不同确定工作开关管与占空比,再与三角载波比较法生成开关管门极脉冲。

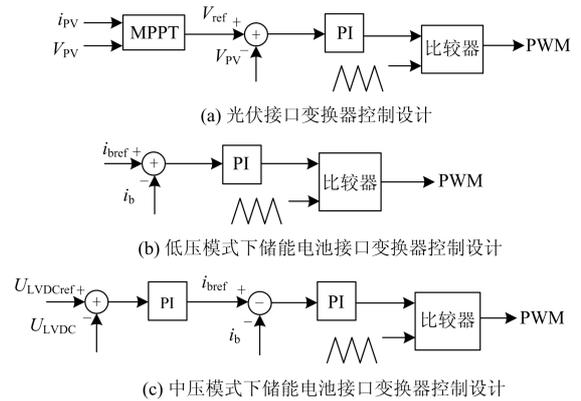


图 9 非隔离 DC-DC 变换器控制设计

Fig. 9 Control strategy of non-isolated DC/DC

低压母线可以通过 DC/AC 驱动交流负荷,控制策略见图 10。其中: V_{oref} 为交流负荷输出电压参考值; V_o 为输出电压值,DC/AC 主要控制输出电压,电压误差经过 PI 后,输入到正弦脉宽调制单元产生驱动脉冲。

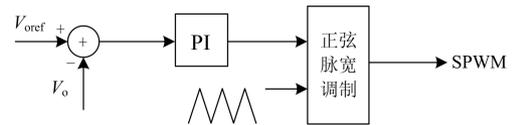


图 10 DC/AC 变换器控制设计

Fig. 10 Control strategy of DC/AC module

4 仿真实验验证

4.1 系统主要参数

为了验证本文提出的基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统的有效性,在 EMTDC/PSCAD 中搭建仿真模型。光伏阵列参数、直流变压器参数以及系统其他参数如表 1、表 2、表 3 所示。

表 1 光伏参数

Table 1 Parameters of PV

参数	数值
短路电流 I_{sc}/A	25.5
开路电压 U_{oc}/V	400
最大功率点电压 V_m/V	238
最大功率点电流 I_m/A	22.5

表 2 直流变压器参数

Table 2 Parameters of DCSST

参数	数值
中压母线电压 U_{MVDC}/V	1 500
低压母线电压 U_{LVDC}/V	400
开关频率 f_s/kHz	10
变压器变比 n	500:400
辅助串联电感 L/mH	0.67
DAB 单元直流电容 $C/\mu F$	3 300
DAB 单元个数	3

表 3 系统其他参数

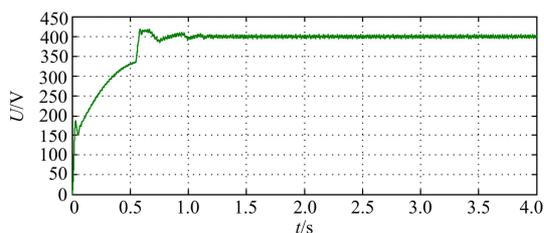
Table 3 Other parameters of the system

参数	数值
直流负荷 R_1/Ω	50
交流负荷 R_2/Ω	18
电池电压 U_b/V	192

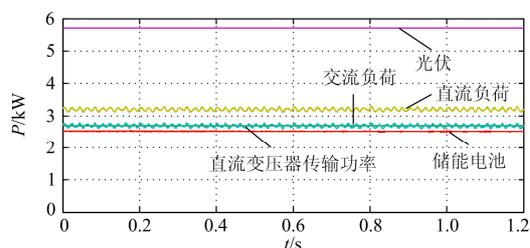
4.2 仿真分析

系统处于低压工作模式下, 稳态运行时系统工作波形如图 11。图 11(a)低压母线电压由直流变压器控制, 基本稳定在 400 V。图 11(b)中光伏以最大功率追踪模式运行, 储能电池以恒定的功率充电, 此时光伏发出功率不足时, 中压母线侧通过直流变压器向低压侧传输功率, 本文储能电池以充电为正方向。图 11(c)为直流变压器中单个 DAB 工作情况, 高低压两侧全桥交流输出电压 u_{h11} 和 u_{h12} 均为方波, 彼此间移开角度, 并且 u_{h11} 超前 u_{h12} , 功率由中压侧流向低压侧。原边电感电流 i_{Ll} 为近似于梯形波的高频交流。

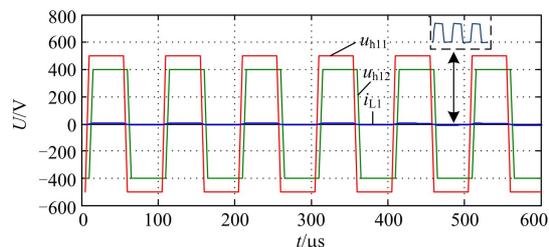
当光伏发出功率剩余并且储能以恒定的功率放电时, 低压母线侧则通过直流变压器向中压侧馈电, 如图 11(d)、(e)示, DAB 单元中 u_{h11} 的相位滞后 u_{h12} 。



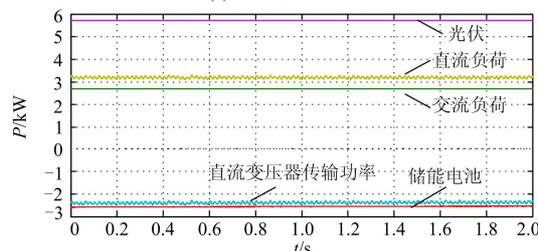
(a) 低压母线电压



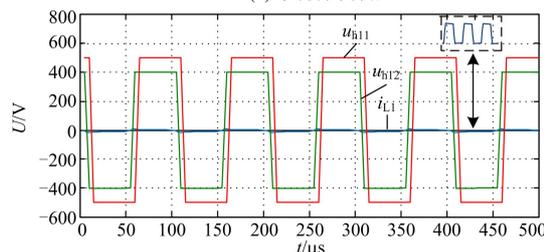
(b) 系统功率分配



(c) DAB滞后工作波形



(d) 系统功率分配

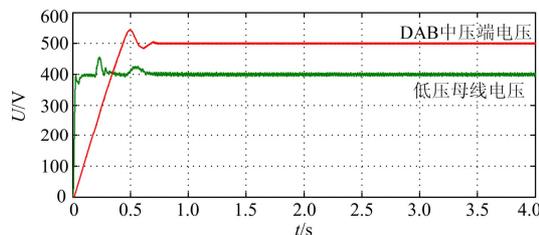


(e) DAB超前工作波形

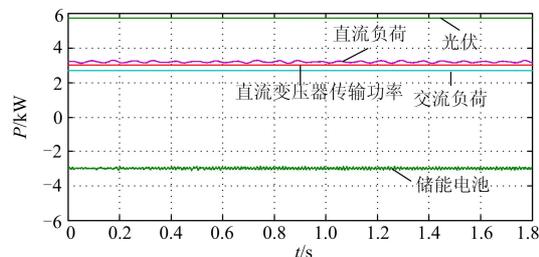
图 11 低压模式下系统稳定运行曲线

Fig. 11 Simulation waveforms of LVDC model

系统处于中压工作模式下, 稳态运行时系统工作波形如图 12。图 12(a)中低压母线电压由储能装置控制, 基本稳定在 400 V, 中压母线电压由直流变压器控制, 从图 12(a)中可以看出单个 DAB 中压端电压基本稳定在 500 V。图 12(b)、(c)可以看出, 光伏和储能电池向系统发出功率, 低压母线侧通过直流变压器向中压侧供电。



(a) 中低压母线电压



(b) 系统功率分配

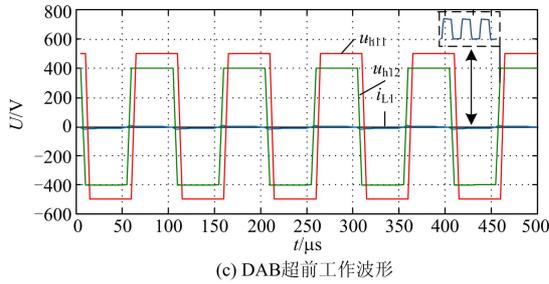
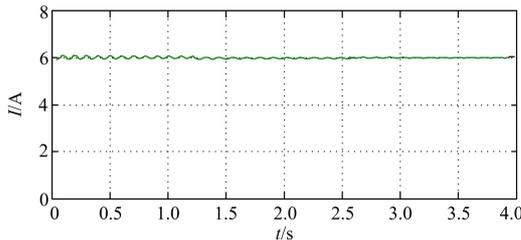


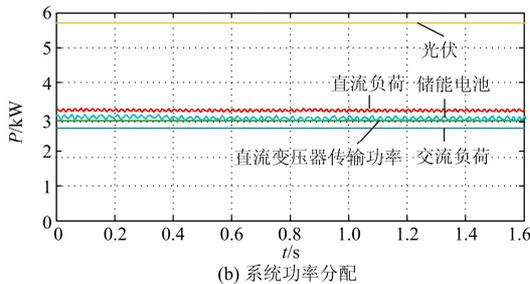
图 12 中压模式下系统稳定运行曲线

Fig. 12 Simulation waveforms of MVDC model

系统处于功率工作模式下，稳态运行时系统工作波形如图 13。图 13(a)中根据要传输的功率计算出中压侧电流的参考值，并由直流变压器控制中压侧电流。此时 DAB 单元中工作情况如图 13(c)所示， u_{h11} 超前 u_{h12} ，功率由中压侧流向低压侧，图 13(b)为此时系统功率分配图。



(a) 中压电流



(b) 系统功率分配

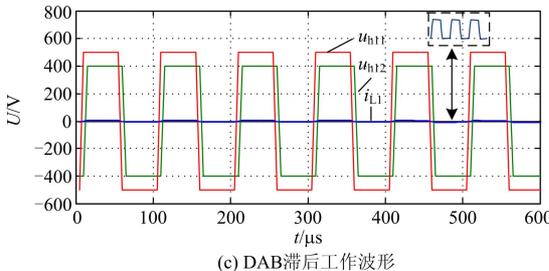
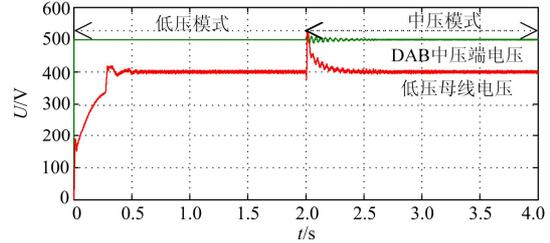


图 13 功率模式下系统稳定运行曲线

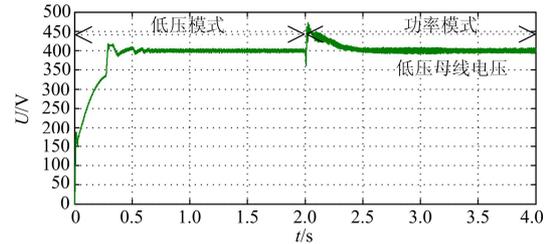
Fig. 13 Simulation waveforms of power model

图 14 为系统工作模式切换图。图 14(a)中 0~2 s 时，系统工作在低压模式，直流变压器控制低压母线电压基本稳定在 400 V，中压母线电压固定，2 s 后系统切换到中压模式，此时低压母线由储能电池

维持，中压母线电压由直流变压器控制，经过短暂的暂态过程后，低压母线电压基本稳定在 400 V，DAB 中压端电压基本稳定在 500 V。图 14(b)则为低压工作模式与功率工作模式之间切换，从图中可以看出，经过短暂的暂态过程后，低压母线电压基本稳定在 400 V。



(a) 中低压母线电压



(b) 低压母线电压

图 14 系统工作模式切换图

Fig. 14 Transient waveforms of system model

低压母线通过 DC/AC 驱动交流负载，在系统工作的 3 个模式中，通常控制 DC/AC 工作在功率因数为 1 的状态，如图 15 所示。

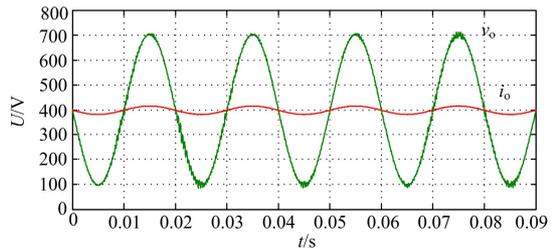


图 15 交流负载稳定运行曲线

Fig. 15 Simulation waveforms of AC loads

5 结论

本文提出了一种基于高频链直流变压器的柔性中压直流配电系统，其中压和低压母线均为直流。从理论上分析了高频链直流变压器以及其他典型变频器的特性，并设计了系统的工作模式，各部分控制器。基于 EMTDC/PSCAD 的仿真结果验证了控制器的正确性、系统的有效运行。该系统相比于交流配电网，不需要对电压的相位和频率进行追踪，可靠性与可控性高；相比于传统直流微电网采用了高频变压器代替工频变压器，不仅实现电压匹

配与电气隔离, 同时带来了体积小、重量轻、成本低、降低噪声等优点。该系统灵活, 易扩展, 易于实现模块化, 实际中可按要求进一步扩展。

参考文献

- [1] ALLEEG, TSCHUDIW. Edison redux: 380 DC brings reliability and efficiency to sustainable data centers[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2012, 10(6): 50-59.
- [2] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [3] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [4] 刘家赢, 韩肖清, 王磊, 等. 直流微电网运行策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2356-2361.
LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2356-2361.
- [5] 张杰, 高腾, 赵威, 等. 直流微网系统能量管理控制技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 36(4): 50-53.
ZHANG Jie, GAO Teng, ZHAO Wei, et al. Research on the energy management control technology of DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 36(4): 50-53.
- [6] SHE X, LUKIC S M, HUANG A Q. DC zonal micro-grid architecture and control[C] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010: 2988-2993.
- [7] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(44): 16-24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(44): 16-24.
- [8] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [9] SHE X, HUANG A Q, WANG G Y. 3-D space modulation with voltage balancing capability for a cascaded seven-level converter in a solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3778-3789.
- [10] 严干贵, 谢国强, 李军徽, 等. 储能系统在电力系统中的应用综述[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 7-12.
YAN Gangui, XIE Guoqiang, LI Junhui, et al. Review of energy storage system in electric power system[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011, 31(3): 7-12.
- [11] 任桂周, 常思勤. 一种基于超级电容器组串并联切换的储能系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 187-195.
REN Guizhou, CHANG Siqin. An energy storage system based on series-parallel switchover of ultra-capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 187-195.
- [12] 周林, 任伟, 廖波, 等. 并网型光伏电站无功电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 168-175.
ZHOU Lin, REN Wei, LIAO Bo, et al. Reactive power and voltage control for grid-connected PV power plants[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 168-175.
- [13] 倪福银, 李正明, 潘天红. 光伏微逆变器中 Boost 变换器的混沌现象分析与控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 149-154.
NI Fuyin, LI Zhengming, PAN Tianhong. Analyzation and control research of chaotic phenomena for Boost converter in photovoltaic micro-inverter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 149-154.
- [14] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [15] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua. Efficiency characterization and optimization of isolated bidirectional DC-DC converter based on dual-phase-shift control for

- DC distribution application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 28(4): 1711-1727.
- [16] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua. Dead-time effect of the high-frequency isolated bidirectional full-bridge DC-DC converter: comprehensive theoretical analysis and experimental verification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 29(4): 1667-1680.
- [17] ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua. A practical solution of high-frequency-link bidirectional solid state transformer based on advanced components in hybrid micro-grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7): 4587-4597.
- [18] 杨永恒, 周克亮. 光伏电池建模及 MPPT 控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 229-234.
- YANG Yongheng, ZHOU Keliang. Photovoltaic cell modelling and MPPT control strategies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 229-234.
- [19] 曹生允, 宋春宁, 林小峰, 等. 用于电池储能系统并网的 PCS 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 93-98.
- CAO Shengyun, SONG Chuning, LIN Xiaofeng, et al. Study of PCS control strategy for battery energy storage grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 93-98.
-
- 收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2016-01-28
- 作者简介:
- 贾 祺(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流配电技术; E-mail: 15948692960@163.com
- 赵 彪(1987-), 男, 博士, 主要研究方向为柔性直流输配电技术和智能功率变换技术; E-mail: zhaobiao112904829@126.com
- 严干贵(1971-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源发电联网运行分析与控制技术。E-mail: yangg@mail.nedu.edu.cn
- (编辑 张爱琴)