

DOI:10.11784/tdxbz202106033

基于 ACC 的海上风电场高压直流输电系统控制策略

栾轲栋^{1,2}, 李耀华^{1,2}, 李子欣^{1,2}, 赵 聪^{1,2}, 王 平^{1,2}

(1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室(中国科学院电工研究所), 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电技术相对于高压交流(high voltage alternating current, HVAC)输电技术具有线路损耗低、输电走廊占地少、不存在交流电网同步问题等突出优势, 特别适用于大容量、长距离、高效率的电能输送场合。相较于传统的电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和以模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)为典型代表的电压源型换流器(voltage source converter, VSC), 主动换相换流器(actively commutated converter, ACC)具有电路拓扑简单、功率因数可控、不存在换相失败风险、具备黑启动的能力、直流侧无需配置储能电容等优点, 在高压直流输电领域尤其是海上风电汇集等场合有广泛的应用前景。本文提出了一种大陆端和离岸端换流站均选用 ACC 作为换流器的海上风电场背靠背高压直流输电系统, 大陆端换流站采用开关频率为 50 Hz 的高功率因数运行的工作模式, 离岸端换流站选取脉冲宽度调制(pulse width module, PWM)的工作模式, 并分别建立了大陆端换流站和离岸端换流站的数学模型, 分析了基于 ACC 的海上风电场高压直流输电系统的黑启动方法和稳态功率传输特性, 并提出了一种大陆端换流站采用直流电流控制、离岸端换流站选取交流侧电压控制的控制策略。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 500 kV/1 000 MW 的基于 ACC 的海上风电场背靠背高压直流输电系统仿真模型, 仿真结果验证了本文理论分析以及所提出控制策略的正确性和有效性。

关键词: 主动换相换流器; 海上风电; 高压直流输电系统; 黑启动; 功率传输

中图分类号: TK448.21

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1241-07

Control Strategy of Offshore Wind Farm HVDC Transmission System Based on Actively Commutated Converter

Luan Kedong^{1,2}, Li Yaohua^{1,2}, Li Zixin^{1,2}, Zhao Cong^{1,2}, Wang Ping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive (Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Different from high voltage alternating current transmission, high voltage direct current (HVDC) technology has advantages such as low line loss, reduced transmission corridor floor space, and no AC grid synchronization problem. It is especially suitable for large capacity, long distance, and high efficiency power transmission systems. Compared with the traditional line commutated converter and the voltage source converter represented by the modular multilevel converter, the actively commutated converter (ACC) has advantages, including simple circuit topology, a controllable power factor, no risk of commutation failure, black start capability, and no need to configure the energy storage capacitor on the DC side. It has wide applicability in the field of HVDC transmission, especially in offshore wind power gathering and other applications. In this paper, a back-to-back HVDC transmission system for offshore wind farm is proposed, in which ACC is selected as the converter in both the mainland and offshore converter stations. The mainland converter station adopts the high power factor operation mode with the switch-

收稿日期: 2021-06-21; 修回日期: 2021-07-16.

作者简介: 栾轲栋(1994—), 男, 博士研究生, luankd@mail.iee.ac.cn.

通信作者: 李子欣, lzx@mail.iee.ac.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077206).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077206).

ing frequency of 50 Hz, and the offshore converter adopts the pulse width module mode. The mathematical models of the mainland converter station and the offshore end are established, and the black start method and steady-state power transmission characteristics are analyzed. A control strategy for DC current control of the converter station at the land end and AC voltage control of the converter station at the offshore end is proposed. A 500 kV/ 1 000 MW simulation model based on ACC offshore wind farm back-to-back HVDC transmission system is built in PSCAD/EMTDC. The simulation results verify the correctness and effectiveness of the theoretical analysis and the proposed control strategy.

Keywords: actively commutated converter; offshore wind farm; high voltage direct current transmission system; black start; power transmission

相对于高压交流 (high voltage alternating current, HVAC) 输电技术, 高压直流 (high voltage direct current, HVDC) 输电技术具有线路损耗低、输电走廊占地少、不存在交流电网同步问题^[1-2]等突出优势, 特别适用于大容量、长距离、高效率的电能输送。

基于晶闸管构建的电网换相换流器 (line commutated converter, LCC) HVDC 系统的传输电压高、容量大, 目前的最高电压已达 $\pm 1\ 100$ kV, 容量已达 1 ~ 20 GW 级别^[3-4]。但是, 晶闸管属于半控型功率半导体器件, 其开通与关断时刻受到交流侧电路状态限制而不能独立控制。交流电网故障时 LCC 可能无法实现正常换相, 存在换相失败风险, 交流故障穿越困难, 且无法实现黑启动^[5], 不能连接无源网络或风电、光伏等可再生能源发电系统; LCC 有功功率与无功功率不能解耦控制^[6], 交流侧产生大量的谐波和无功电流, 需要大量的无功补偿设备以及多个频率的谐波滤波设备。在海上风电应用时需要额外的无功补偿设备或者需要风电机组具备交流电压控制能力, 这会提高风电设备的技术难度和造价。

电压源型换流器 (voltage source converter, VSC) 不存在 LCC 的换相失败问题, 交流侧电流谐波含量小, 且可以独立控制有功、无功功率^[7]。传统的两电平或三电平变流器谐波含量大, dV/dt 引起的电磁干扰严重, 且运行效率较低。德国学者 Marquardt 提出的模块化多电平变流器 (modular multi-level converter, MMC) 具有模块化结构、能够输出多电平、可靠性高以及效率高等优点^[8-9], 已经成为 VSC-HVDC 技术中的主流方案, 并在包括海上风电在内的国内外多个 HVDC 工程获得应用^[10-11]。但是 MMC 除了数量较多的功率半导体器件, 对子模块储能电容要求也较高, 系统体积及质量大^[12-13], MMC 通常采用阀塔结构安装, 这会进一步加大海上换流器建造难度, 造价也相对昂贵, 限制了其在海上风电高压直流接入及输送场合的应用。

基于自关断器件的主动换相换流器 (actively

commutated converter, ACC) 和 LCC 的电路拓扑比较类似, 本质上也属于电流源型换流器。ACC 换相过程不受外部电路状态制约, 可以解决 LCC 无法黑启动、不能向无源网络供电、有功和无功功率不能独立解耦控制和存在换相失败风险等问题^[14], 且电网侧所需的无功补偿装置少; 相较于 MMC, ACC 结构简单, 所需的功率半导体器件相对较少, 且直流侧无需大量的储能电容^[15], 可以减小换流器的体积和质量, 降低工程成本。此外, ACC 可以灵活控制直流侧电压、电流^[16], 具备直流短路故障抑制能力。

目前, 相关文献针对 ACC 在 HVDC 系统的应用也开展了一定的研究。文献[17-18]研究了 ACC 在风电场 HVDC 汇集系统中应用时的控制策略, 并进行了仿真验证; 文献[19]对一端采用 LCC、一端采用 ACC 的背靠背混合直流输电系统进行了研究, 并对其功率传输特性、基本控制策略、启动方法、潮流翻转策略和故障工况下的控制策略进行分析和设计。文献[20]针对 ACC 的有功功率与无功功率耦合关系复杂导致功率因数难以控制的问题, 提出一种基于 dq 坐标系的间接电流控制方法, 实现了有功功率和无功功率的解耦控制, 并分析了变流器的稳定运行范围, 指出了 ACC 无功功率受限于有功功率的原因。文献[21]研究了 ACC 在风力发电高压直流接入系统的应用, 并提出了 ACC 功率及直流电压控制策略。

本文针对基于 ACC 的海上风电场背靠背高压直流输电系统, 提出了一种大陆端换流站工作在开关频率为 50 Hz、离岸端换流站选取脉冲宽度调制 (pulse width module, PWM) 的工作模式, 分别建立了大陆端与离岸端换流器数学模型, 并分析了该系统的黑启动方法和稳态功率传输特性; 提出了一种大陆端换流站采用直流电流控制、离岸端换流站采用交流侧电压控制的控制策略。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 500 kV/ 1 000 MW 基于 ACC 的海上风电场背靠背高压直流输电系统的仿真模型, 仿真结果验证了本文理论分析以及所提出控制策略的正确性和有效性。

1 ACC 工作原理及数学模型

基于 ACC 的海上风电场高压直流输电系统的电路结构如图 1 所示,大陆端和离岸端换流站均采用三电平 ACC 作为换流器的基本单元. 大陆端换流器由 ACC1 和 ACC2 直流侧串联、交流侧并联构成, 记为 ACC-HVDC1, 大陆端换流器经变压器、交流滤波器连接电网; 离岸端换流器由 ACC3 和 ACC4 由直流侧串联、交流侧并联构成, 记为 ACC-HVDC2, 后经变压器、交流滤波器连接海上风电场; 大陆端换流站与离岸端换流站由电缆经直流电抗器连接. 图 1 中, I_{dc} 、 U_{dc1} 和 U_{dc2} 分别是系统直流电流、大陆端换流器的直流电压和离岸端换流器的直流电压.

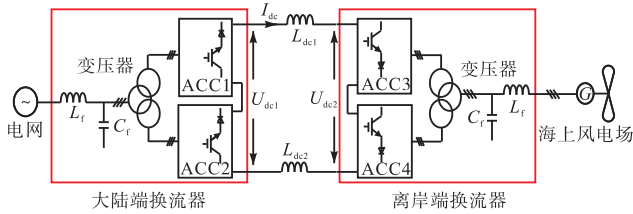


图 1 基于 ACC 的海上风电高压直流输电系统电路原理
Fig.1 Circuit principle diagram of the HVDC system of offshore wind farm based on ACC

1.1 三电平 ACC 工作原理

图 2 为三电平 ACC 的基本电路拓扑, 三电平 ACC 主电路由三相 6 个桥臂构成, 每个桥臂由一定数量的可关断逆阻型功率半导体器件组成, 可关断逆阻型功率半导体器件可以是对称型 IGCT 或者压接型 IGBT 与二极管构成的组合逆阻型器件串联组成, 上、下两个桥臂构成一个相单元, 直流侧通过直流滤波电抗器 L_{dc} 连接, 交流侧通过二阶 LC 滤波电路连接交流网络.

三电平 ACC 相单元的上桥臂开关管导通时, 该相输出的电流为 I_{dc} , 记为状态 1; 下桥臂开关管导通时, 该相的输出电流为 $-I_{dc}$, 记为状态 -1; 上下桥臂的开关管同时导通或关断时, 该相输出电流为 0, 记为状态 0, 三电平 ACC 的开关状态可表示为

$$G_{k=a,b,c} = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{上下桥臂同时导通或关断} \\ -1 & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad (1)$$

此外, 为了保证直流电流的连续性, 三电平 ACC 正常工作时其三相中上、下桥臂有且仅各有一个桥臂处于导通状态, 其开关约束条件与 VSC 明显不同, 可以表示为

$$\sum_{k=a,b,c} G_k = 0 \quad (2)$$

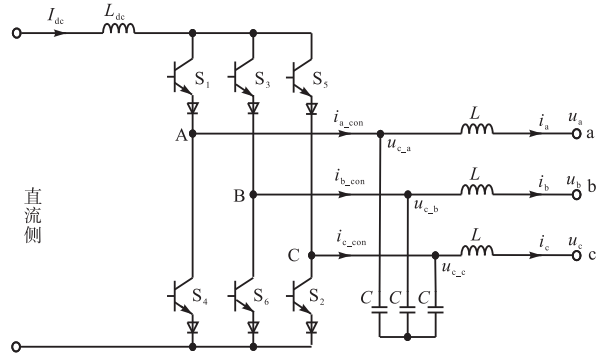


图 2 ACC 电路拓扑
Fig.2 Circuit topology of the ACC

1.2 ACC 数学模型

1.2.1 大陆端换流器数学模型

大陆端换流器的两台三电平 ACC 工作在 50 Hz 工作模式, 即三电平 ACC 的功率半导体器件的开关频率为 50 Hz, 记为基频开关 ACC. 由式 (1)、(2) 可知, 忽略叠流时间, 基频开关 ACC 的 6 个桥臂在基波周期内的导通时间应均为 $T/3$. 根据处于导通状态的桥臂位置, 基波周期内的开关状态可分为 6 种类型. 表 1 为三电平 ACC 6 种开关状态的详细信息, 基波周期内 6 种开关状态交替变化, 且每个开关状态的持续时间为 $T/6$.

表 1 基频开关 ACC 开关状态
Tab.1 Switching state of the ACC with switching frequency

导通桥臂	开关状态	导通角度/(°)	直流电压	
S ₆	S ₁	1#	$30 + \alpha \sim \alpha + 90$	v_{ab}
S ₁	S ₂	2#	$\alpha + 90 \sim \alpha + 150$	v_{ac}
S ₂	S ₃	3#	$\alpha + 150 \sim \alpha + 210$	v_{bc}
S ₃	S ₄	4#	$\alpha + 210 \sim \alpha + 270$	v_{ba}
S ₄	S ₅	5#	$\alpha + 270 \sim \alpha + 330$	v_{ca}
S ₅	S ₆	6#	$\alpha + 330 \sim 360, 0 \sim 30 + \alpha$	v_{cb}

根据表 1, ACC1、ACC2 和 ACC-HVDC1 的输入电流波形如图 3 所示. ACC1 的 1#开关状态的起始点 $30^\circ + \alpha_1$ 滞后于线电压 U_{ac} 的过零点; ACC2 的 1#开关状态的起始点 $30^\circ - \alpha_2$ 超前于线电压 U_{ac} 的过零点. 当 $\alpha_1 = \alpha_2$ 时, ACC1 和 ACC2 的 1#开关状态的起始点 $30^\circ + \alpha_1$ 和 $30^\circ - \alpha_2$ 是关于线电压 U_{ac} 的过零点对称的.

ACC1、ACC2 和 ACC-HVDC1 输入电流中的基波含量可以用式 (3) ~ (5) 表示.

$$i_{a_ACC1} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \sin(\omega t - \alpha) \quad (3)$$

$$i_{a_ACC2} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

$$i_{a_ACC-HVDC1} = i_{a_ACC1} + i_{a_ACC2} = 2 \times \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_{dc} \sin \omega t \cos \alpha \quad (5)$$

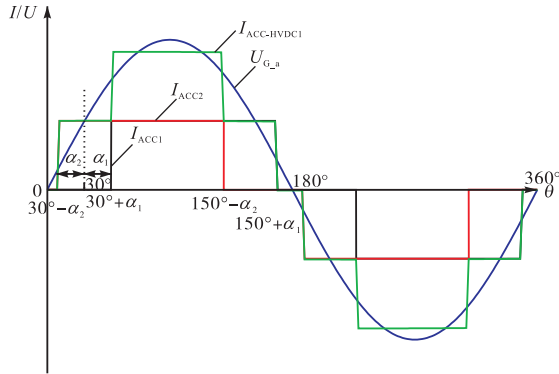


图 3 大陆端换流器电流波形

Fig.3 Current waveform of the mainland side converter

由式(3)~(5)可以看出, ACC1 和 ACC2 的基波电流幅值由直流电流幅值大小决定, 基波相位由触发角大小决定; ACC-HVDC1 输出电流的基波幅值与触发角的余弦值成正比, 基波电流的相位与触发角的大小无关, 与交流侧电压相位保持一致, 实现高功率因数运行。

1.2.2 离岸端换流器数学模型

离岸端换流器的两台三电平 ACC 工作在 PWM 工作模式, 以 ACC3 为例, 根据基尔霍夫电压定律和电流定律, 可以得到 ACC3 在同步旋转坐标系下的数学模型为

$$C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{d_con} \\ i_{q_con} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega C \begin{bmatrix} u_{cq} \\ -u_{cd} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} i_q \\ -i_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: u_{cd} 和 u_{cq} 分别为滤波电容电压的 dq 轴分量; i_{d_con} 和 i_{q_con} 分别为 ACC3 输出电流的 dq 轴分量; i_d 和 i_q 分别为交流侧电网电流的 dq 轴分量; u_d 和 u_q 分别为交流侧网络电压的 dq 轴分量; ω 为交流侧电网电压的角频率。

离岸端换流站离网工作时, 交流侧电网电流为零, 此时可得电容电压与直流电流及调制度的关系为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} = \frac{I_{dc}}{\omega C} \begin{bmatrix} m_d \\ -m_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 m_d 和 m_q 为调制度 m 的 dq 轴分量。可以看出, 离岸端换流站离网工作时控制调制度 m 的 dq 轴分量即可控制交流侧电容电压, 且直流侧电流需满足

$$I_{dc} \geq \frac{\omega C}{m_{max}} U_c \quad (9)$$

式中: m_{max} 为调制度的最大值; U_c 为交流电容电压的幅值。

并网模式下, 采用电网电压锁相并考虑 ACC 的稳态模型, 式(6)和(7)可以简化为

$$\begin{cases} u_d = \frac{1}{\omega C} m_d I_{dc} - \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} i_q \\ u_q = \frac{-1}{\omega C} m_q I_{dc} + \frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} i_d \end{cases} \quad (10)$$

可以看出, 控制调制度 m 的 q 轴分量即可控制交流网络电压 d 轴分量, 控制调制度 m 的 d 轴分量可以实现交流网络电压 q 轴分量调节。

2 基于 ACC 的海上风电高压直流输电系统控制策略

根据海上风电场的状态, 可以将基于 ACC 的海上风电场直流输电系统的工况分为两个阶段: 第 1 阶段为直流输电系统直流电流的建立, 第 2 阶段为海上风电场启动及变流器并网输电。在第 1 阶段, 大陆端换流站控制直流电流, 为离岸端换流站提供稳定的直流电流, 此时, 离岸端换流站处于通路状态, 即离岸端换流站的换流器三相桥臂同时导通, 为直流电流提供通路; 直流电流稳定后, 进入第 2 阶段, 离岸端换流站为交流侧电容充电, 并为海上风电场提供启动功率, 风电场启动并网向大陆端电网输送功率。

2.1 大陆端换流站控制策略

根据大陆端换流站的数学模型, 大陆端换流站的控制策略如图 4 所示, 采用直流电流控制, 采用电网电压锁相, 将三相静止坐标系下的交流量变换为同步旋转坐标系下的直流量, 以便于控制参数的设计。

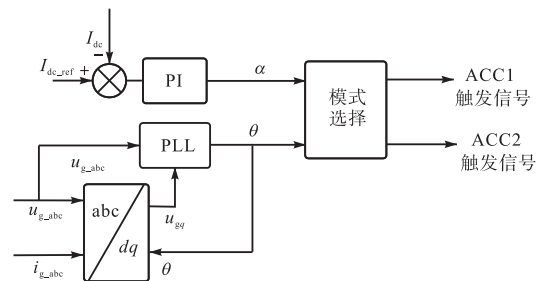


图 4 大陆端换流站控制框图

Fig.4 Control diagram of the mainland converter

直流电流采样值 I_{dc} 和直流电流给定值 I_{dc_ref} 的误差值直接经过 PI 控制器, 得到大陆端换流站 ACC 的触发角 α , 大陆端交流电网电压 u_{g_abc} 通过锁相环 PLL 得到交流侧电网的相位 θ , 模式选择模块根据

ACC1、ACC2 的超前/滞后模式、触发角 α 和电网电压相位 θ , 生成 ACC1、ACC2 对应的触发信号, 控制对应的功率半导体器件.

2.2 离岸端换流站控制策略

离岸端换流站在第 1 阶段处于不控状态, 三相桥臂全部导通为直流电流提供回路. 直流电流达到额定值后进入第 2 阶段, 离岸端换流站控制交流电压, 为海上风电场发电机组的启动提供能量, 实现风电场的黑启动, 并为风电场换流器并网提供稳定的交流电源.

大陆端换流站控制直流电流, 对于离岸端换流站, 可以将其控制策略简化为直流电流恒定的 ACC 逆变器, 控制框图如图 5 所示, 将三相静止坐标系转换到同步旋转坐标系下, θ^* 为交流电压参考值的相位, 交流侧电压采样值的 dq 轴分量与交流电压参考值的 dq 分量的误差经过 PI 控制器并归一化之后, 得到调制度的 dq 分量, 同时调制度 m_d 和 m_q 需要满足式 (11), 得到的 m_d 、 m_q 送入 PWM 调制模块得到 ACC3 和 ACC4 对应的触发信号, 控制对应的功率半导体器件.

$$(m_d^2 + m_q^2) \leq m_{\max}^2 \quad (11)$$

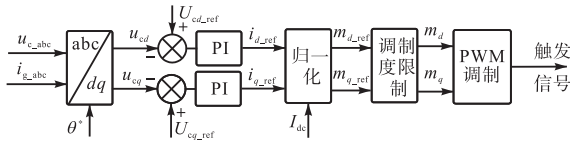


图 5 离岸端换流站控制框图

Fig.5 Control diagram of the offshore converter

3 仿真验证

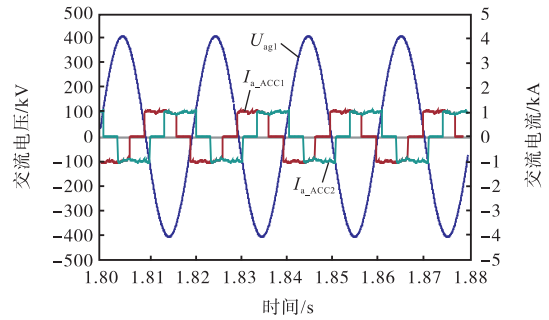
为了验证所提出的基于 ACC 的海上风电场高压直流输电系统控制策略的正确性和有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中建立了电路结构如图 2 所示、主要电路参数如表 2 所示的仿真模型.

表 2 基于 ACC 的海上风电场高压直流输电系统主要电路参数

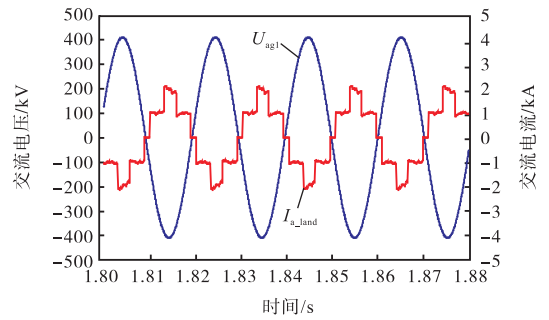
Tab.2 Main circuit parameters of the HVDC transmission system of the offshore wind farm adopting ACC

参数	数值
容量/MW	1 000
额定直流电压/kV	500
交流电压/kV	500
额定直流电流/kA	2
变压器变比	500 kV/250 kV
直流线路等效电阻/ Ω	1
直流电抗器/H	1.5

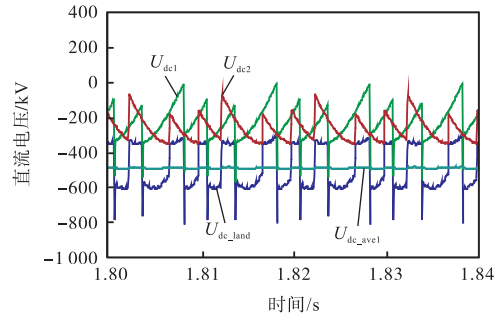
大陆端换流站 ACC 工作在开关频率为 50 Hz 的工作模式, ACC1 和 ACC2 的 a 相电流和电网 a 相电压如图 6(a) 所示, 大陆端换流站向电网传输能量, 电流 I_{a_ACC1} 和 I_{a_ACC2} 均为三电平, 且 I_{a_ACC1} 的相位滞后于 U_{ag1} , I_{a_ACC2} 的相位超前于 U_{ag1} , 大陆端电网电流 I_{a_land} 是 ACC1 和 ACC2 输出电流之和, 如图 6(b)



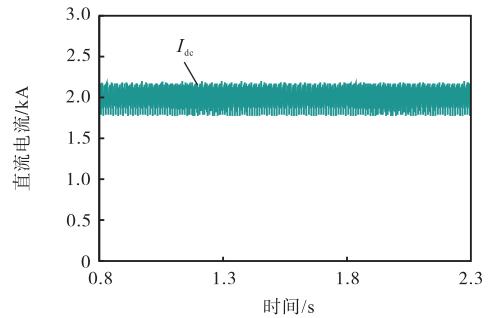
(a) 交流侧 a 相电网电压及 ACC1、ACC2 输出电流



(b) 交流侧 a 相电网电压及电流



(c) 大陆端换流站直流电压



(d) 大陆端换流站直流电流

图 6 大陆端换流站仿真结果

Fig.6 Simulation results of the mainland converter

所示,由于功率由离岸端换流站流向大陆端换流站,大陆端换流站为接受功率,大陆端交流侧电流 I_{a_land} 与电压 U_{ag1} 基本保持相位相反,大陆端换流站工作在高功率因数运行状态. 图 6(c)、(d)为大陆端换流站及换流器 ACC1、ACC2 的直流电压和直流电流,可以看出 ACC1、ACC2 的电压均为六脉动,即 ACC 的开关频率为 50 Hz,大陆端换流器的直流电压为 12 脉动,且直流电流达到了额定值.

离岸端换流站工作在 PWM 工作模式下,从图 7(a)、(b)可以看出,ACC3、ACC4 的开关频率相对

较高,额定工况下,直流电压平均值在额定直流电压,图 7(c)为交流侧 a 相电压和 a 相电流,可以看出,稳态工况下,由于功率由离岸端换流站流向大陆端换流站,离岸端换流站为发出功率,能够通过控制调制度达到离岸端交流电压与风电场输出电流同相位,实现网侧高功率因数运行. 图 7(d)为离岸端交流侧电容电压,可以看出 1 s 开始,离岸端换流器解锁,进入交流侧电容电压控制模式,交流侧电容电压逐渐升高达到给定值,从而实现黑启动.

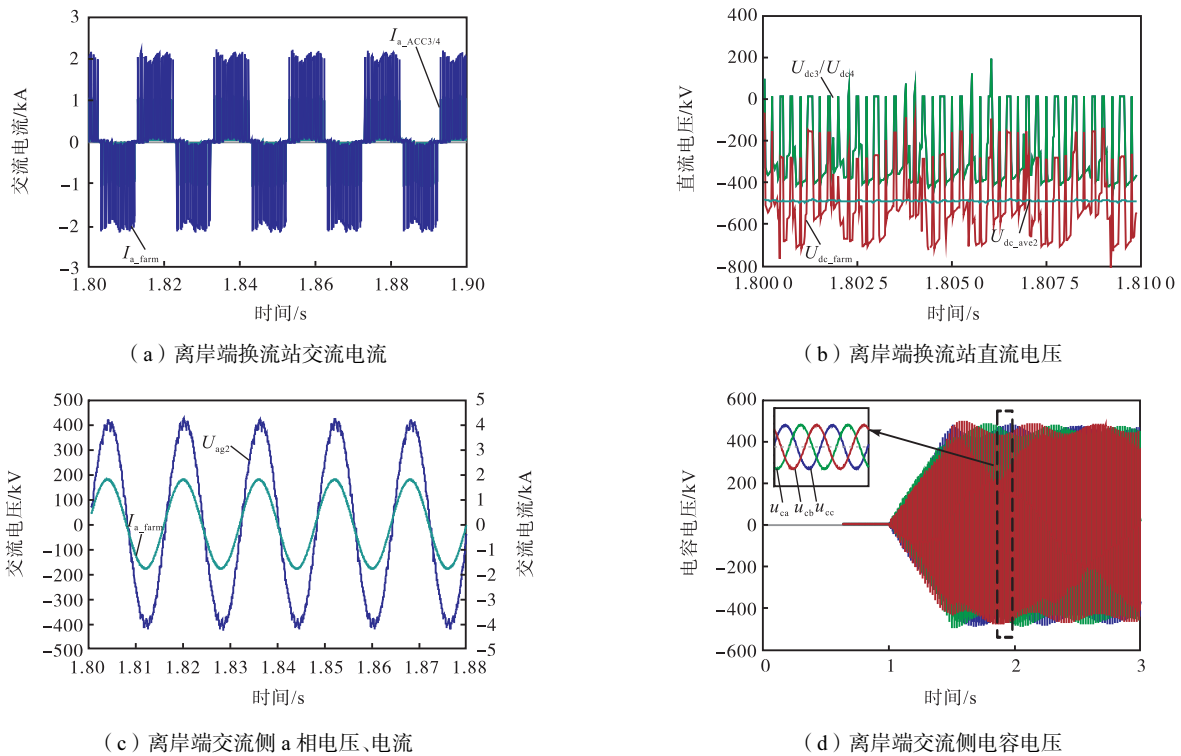


图 7 离岸端换流站仿真结果
Fig.7 Simulation results of the offshore converter

4 结 语

本文针对基于 ACC 的海上风电场背靠背高压直流输电系统,提出了一种大陆端换流站工作在开关频率为 50 Hz、离岸端换流站选取 PWM 调制的工作模式,并分别建立了大陆端换流站和离岸端换流站的数学模型. 分析了该系统的黑启动方法和稳态功率传输特性,并提出一种大陆端换流站采用直流电流控制、离岸端换流站采用交流侧电压控制的控制策略. 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 500 kV/1 000 MW 基于 ACC 的海上风电场背靠背高压直流输电系统的仿真模型,仿真结果验证了本文理论分析以及所提出控制策略的正确性和有效性.

参考文献:

[1] 汤广福, 庞 辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771 (in Chinese).

[2] Ram Adapa. High-wire act[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2012, 10(6): 18-29.

[3] Hu B, Xie K, Tai H M. Optimal reliability allocation of ± 800 kV ultra HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1174-1184.

- [4] Lei Q, Qi S, Xiang C, et al. Parameter extraction and wideband modeling of ± 1100 kV converter valve[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1303-1313.
- [5] Guo C, Yang Z, Jiang B, et al. An evolved capacitor-commutated-converter embedded with anti-parallel thyristors based dual-directional full-bridge module[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 928-937.
- [6] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
Zhao WanJun. High Voltage DC Transmission Engineering Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004((in Chinese)).
- [7] 王萍, 王尉, 贝太周, 等. 数字控制对并网逆变器的影响及抑制方法[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2016, 49(5): 472-479.
Wang Ping, Wang Wei, Bei Taizhou, et al. Effects of digital control on grid-connected inverter and its suppression method[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2016, 49(5): 472-479(in Chinese).
- [8] Glinka M, Marquardt R. A new AC/AC multilevel converter family[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(3): 662-669.
- [9] Debnath S, Qin J, Bahrani B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [10] Perez M A, Bernet S, Rodriguez J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [11] Dekka A, Wu B, Fuentes R L, et al. Evolution of topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1631-1656.
- [12] Zhao Cong, Li Yaohua, Li Zixin, et al. Optimized design of full-bridge modular multilevel converter with low energy storage requirements for HVDC Transmission System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 97-109.
- [13] Zhao Cong, Wang Zhe, Li Zixin, et al. Characteristics Analysis of capacitor voltage ripples and dimensioning of full-bridge MMC with zero sequence voltage injection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 2106-2115.
- [14] Xia Bing, Li Yaohua, Li Zixin, et al. Control strategy of dual current source inverters for high power application under unbalanced grid[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems. Jeju, Korea, 2018: 1110-1115.
- [15] 栾轶栋, 李耀华, 李子欣, 等. 适用于高压直流输电的主动换相换流器特定谐波消除脉宽调制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3970-3980.
Luan Kedong, Li Yaohua, Li Zixin, et al. Research on selective harmonic elimination pulse width modulation strategy of actively commutated converter for HVDC applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3970-3980(in Chinese).
- [16] Guo X, Yang Y, Zhang X. Advanced control of grid-connected current source converter under unbalanced grid voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9225-9233.
- [17] Torres-Olguin A E, Garces A, Molinas M, et al. Integration of offshore wind farm using a hybrid HVDC transmission composed by the PWM current-source converter and line-commutated converter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 125-134.
- [18] Xia Yuanye, Ahmed K. H, Williams B W. A PWM current source-based DC transmission system for multiple wind turbine interfacing[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 784-796.
- [19] 薛英林, 徐政, 潘武略, 等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 98-103.
Xue Yinglin, Xu Zheng, Pan Wulue, et al. Modeling and simulation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 98-103(in Chinese).
- [20] 李玉玲, 鲍建宇, 张仲超. 间接电流控制可调功率因数电流型 PWM 变流器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 49-53.
Li Yuling, Bao Jianyu, Zhang Zhongchao. Indirect current control adjustable power factor current source PWM converter[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2007, 27(1): 49-53(in Chinese).
- [21] Xia Yuanye, Ahmed K H, Williams B W. A PWM current source-based DC transmission system for multiple wind turbine interfacing[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 784-796.

(责任编辑: 金顺爱)