

面向能源互联网的多端口 DC/DC 能源路由器控制策略研究

马文忠¹, 李冠成¹, 张奎同², 杨淑娟³, 魏孟迪¹, 唐毓振¹, 宋玉成⁴, 董磊¹

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 兖矿集团有限公司, 山东 邹城 273500;
3. 山东交通职业学院, 山东 潍坊 261100; 4. 中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 分析了目前多端口直流(DC, direct current)转DC(DC/DC)能源路由器的特点和缺陷, 优化设计了一种面向能源互联网的多端口DC/DC能源路由器。通过对不同工况下运行电压的需求分析, 对多端口DC/DC能源路由器进行了子模块全桥比例设计, 在此基础上提出了一种实现无闭锁穿越直流故障的交直流(AC/DC, alternating current/DC)解耦的控制策略。该多端口DC/DC能源路由器用于实现多个电压等级不同的直流电网的相互连接, 既保留了传统直流自耦变压器技术低成本、低损耗的优势, 又有效改善了其无法应对直流故障的缺点。最后, 在MATLAB/Simulink环境进行了仿真测试, 验证了该技术正常运行时的稳定性、抑制直流故障的可行性和控制策略的有效性。

关键词: 能源互联网; 能源路由器; 直流自耦变压器; 直流故障

中图分类号: TM402

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00197

Research on the control strategy of multi-port DC/DC energy router for the energy Internet

MA Wenzhong¹, LI Guancheng¹, ZHANG Kuitong², YANG Shujuan³, WEI Mengdi¹,
TANG Yuzhen¹, SONG Yucheng⁴, DONG Lei¹

1. College of New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Yankuang Group Co., Ltd., Zoucheng 273500, China

3. Shandong Transport Vocational College, Weifang 261100, China

4. College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: The characteristics and shortcomings of the current multi-port direct current (DC) to DC (DC/DC) energy router were analyzed. A multi-port DC/DC energy router for the energy Internet was optimized and designed. Through the analysis of the operating voltage requirements under different working conditions, the full-bridge proportional design of the sub-module was proposed. On this basis, an alternating current (AC) to DC (AC/DC) decoupling control strategy to realize riding through the DC fault without de-blocking any devices was proposed. The multi-port DC/DC energy router was used to realize the interconnection of multiple DC power grids with different voltage levels. It not only retained the advantages of low cost and low loss of the traditional DC autotransformer, but also effectively improved the shortcomings that the DC autotransformer cannot ride through the DC fault. Finally, the simulation test was carried out in the MATLAB/Simulink environment to verify the stability of the technology in the normal operation, the feasibility of suppressing the DC fault and the effectiveness of the control strategy.

Key words: energy Internet, energy router, DC autotransformer, DC fault

收稿日期: 2020-06-21; 修回日期: 2020-09-24

通信作者: 董磊, upc-auto@163.com

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(No.ZR2018MEE040, No.ZR2019MEE094)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Shandong Province(No.ZR2018MEE040, No.ZR2019MEE094)

1 引言

21世纪以来,传统能源日渐枯竭,人们对新能源的需求日益急迫,妥善合理地实现新能源的大规模有效利用成为一个新的前进方向。向着这个方向创新发展推动了全球能源产业的转型,为了实现资源整合和能源的多级利用,能源互联网的概念由此诞生。能源互联网指的是以电力系统为核心,融合交通、热力、天然气等多种网络形成的现代综合能源系统,其对于能源高效利用、社会可持续发展和资源统筹开发具有重要作用,美国经济学家杰里米·里夫金称之为“第三次工业革命”^[1-2]。构建能源互联网首先应当构建可实现能源互联、容纳新能源大范围并入的直流电网,构建未来适合新能源大范围并入的直流电网面临着一些关键性技术难题。一方面,由于直流电网响应时间常数较小,构建适合新能源大范围并入的直流电网对直流电网运行控制和保障技术、直流电网系统仿真、直流电网快速故障检测技术提出了更高的要求。另一方面,低成本、低损耗、安全可靠的设备研发也是直流电网必须解决的核心问题^[3-6]。

当前,国内外专家学者已经提出多种适合应用于不同场合的多端口DC/DC变换器拓扑。文献[7]给出了一种使用多端高频变换器的多端口DC/DC变换器,该变换器可用于智能微电网,互联多个以直流电为输入/输出的装置。文献[8]介绍了一种用于连接3个电压网络的低成本软开关双向DC/DC变换器,该变换器由两个半桥和一个高频变压器组成。高频变压器在两个半桥之间提供电压电平匹配和电流隔离,以满足安全要求;双半桥的使用使开关器件及其相关栅极驱动元件的数量最小化;软开关是利用缓冲电容和变压器漏感实现的。文献[9-10]提出了一种基于电感—电容—电感电路的多端口DC/DC变换器。该技术主要由多个电压源型换流器的一端在直流侧与直流电网对应连接、另一端在交流侧与谐振电路互联形成。文献[11]给出了一种基于模块化多电平变换器(MMC, modular multilevel converter)的多端口变换器,通过在输出侧并联的方式实现一端输入、多端输出,并改变电压两端变比。文献[12]提出了一种能连接两个双向源/存储端口和一个独立的加载端口的三端口变换器拓扑结构,该拓扑结构将升压级集成到移相全桥变换器,具备0电压开关工作的能力。文献[13]提出了一种

利用低通滤波器和半桥网络代替boost变换器的受控开关的多端口DC/DC变压器拓扑结构,可由一个直流输入产生两个输出——升压和降压。

从功率传输方面来看,上述多端口DC/DC变换器需要经过两级DC/AC变换传输功率,这会导致变换器的所需容量大、成本高、运行损耗高、传输效率低等。为了解决这个问题,文献[6]提出了一种多端口直流自耦变压器技术,将5个MMC直流侧级联、交流侧互联至交流电网。直流侧级联因为可以直接传输大部分直流功率,因此可以显著减小变压器所需容量,在中、低电压变比场合,直流自耦变压器技术可以有效减少变压器所需容量及功率损耗。但是,这种拓扑结构在遇到直流故障时,只能通过断开直流电网、添加旁路子模块等方式应对,不够灵活,且解决速度很慢。

构建能源互联网首先要构建可实现能源互联、新能源大规模并入的直流电网。多端口DC/DC变换器作为互联直流电网的关键性设备之一,有极高的研究意义。本文的研究成果可以实现不同电压等级的互联,而且能够在遇到直流故障时,实现无闭锁故障穿越。因此,多端口DC/DC变换器可以成为能源互联网网络互联的关键性设备之一。

2 多端口DC/DC能源路由器拓扑及基本原理

2.1 多端口DC/DC能源路由器拓扑

三端口DC/DC能源路由器拓扑如图1所示,可以将3个不同电压等级的直流电网连接起来,各直流电网的额定电压分别记作 E_1 、 E_2 、 E_3 ,且 $E_1 < E_2 < E_3$ 。

该三端口DC/DC能源路由器主要由5个MMC直流侧级联、交流侧连接在公共交流母线上组成。其中,低压直流电网 E_1 两端连接到MMC3直流侧两端,中压直流电网 E_2 两端分别连接到MMC2的正极和MMC4的负极,高压直流电网 E_3 两端分别与MMC1的正极和MMC5的负极相连。

文献[6]给出的是一种由5个半桥型MMC级联构成的多端口直流自耦变压器,而本文将半桥型MMC优化替换为文献[14]提出的混合型MMC子模块,混合型MMC的优势在于具备闭锁直流故障、切断故障电流的能力。混合型MMC单相拓扑如图2所示,由图2可以看出,该混合型MMC由全桥子模块(FBSM, full bridge submodule)和半桥子模块(HBSM, half bridge submodule)组成,可以在使变压器获得与全桥

型 MMC 同样的故障穿越和自清除能力的同时,减少器件所需容量和功率损耗,提高了经济性。因此,选择混合型 MMC 作为多端口 DC/DC 能源路由器的设备。

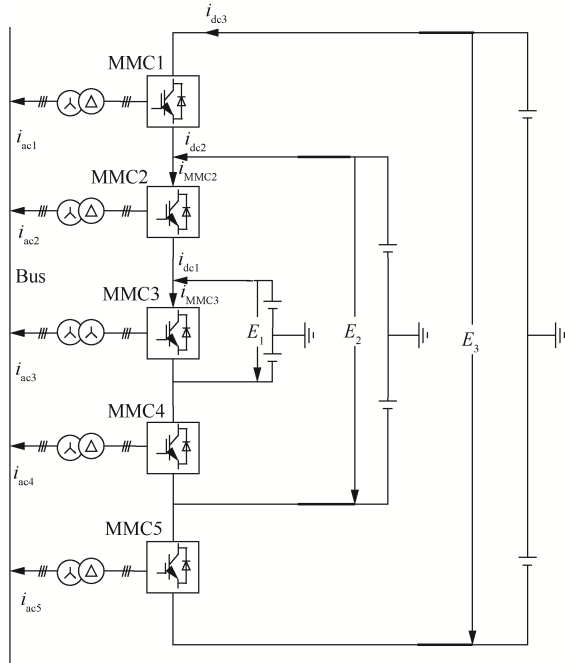


图1 三端口 DC/DC 能源路由器拓扑

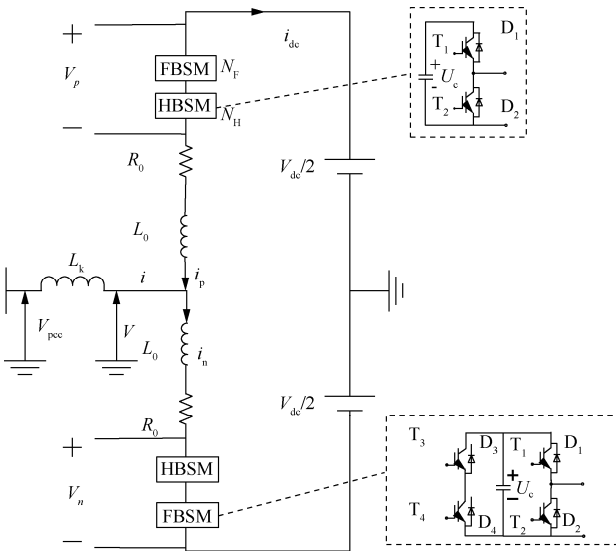


图2 混合型 MMC 单相拓扑

2.2 多端口 DC/DC 能源路由器工作特性及基本原理

通过多端口 DC/DC 能源路由器互联的直流电网之间传输的功率可以分为两部分。一部分功率经过 MMC 变换器 DC/AC 逆变汇入交流系统,再经过 MMC 的 AC/DC 整流传输;另一部功率分则经过 MMC 级联形成的直流电网之间的直流通路进行直接电气连接传输。

多端口 DC/DC 能源路由器在运行时,需要选择一个或多个端口作为电压控制端,控制交流系统的交流电压。其他端口则作为功率控制端,用于控制系统的有功功率相关量。以图 1 所示的三端口 DC/DC 能源路由器为例,可采用 MMC3 为电压控制端,控制公共交流系统的交流电压,其他 MMC 作为功率控制端,控制各直流电网的有功功率,也可由 MMC1 和 MMC5 或者 MMC2 和 MMC4 控制交流系统的交流电压。

简单分析双端口能源路由器的基本原理,同理可推出多端口 DC/DC 能源路由器的功率传输。双端口能源路由器如图 3 所示,假设该双端口能源路由器中 E_1 向 E_2 传输的有功功率为 P_N , MMC2 逆变的功率以及 MMC1 和 MMC3 整流的功率为

$$\begin{cases} P_2 = P_N \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \\ P_{13} = \frac{P_N}{2} \left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

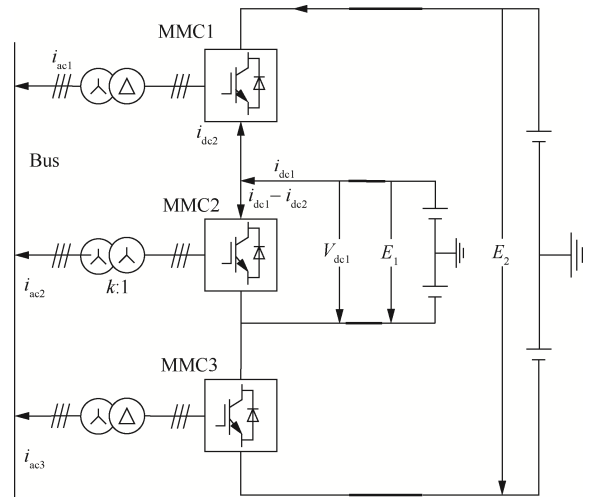


图3 双端口能源路由器

MMC1、MMC2、MMC3 之间由电气通路进行直接电气连接,通过该电气通路直接传输的有功功率为

$$P_d = P_N \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

根据上述对双端口能源路由器的分析,可以对三端口能源路由器进行如下分析。

记图 1 中 E_1 向 E_2 传输的有功功率为 P_{dc1} ,对于 P_{dc1} 部分, MMC1、MMC2、MMC3、MMC4、MMC5 通过 DC/AC 逆变的有功功率为

$$\begin{cases} P_3^{1-3} = P_{dc1} \left(1 - \frac{E_1}{E_3}\right) \\ P_{12}^{1-3} = P_{45}^{1-3} = -\frac{1}{2} P_{dc1} \left(1 - \frac{E_1}{E_3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

其中，上标“1-3”表示功率由 E_1 传输到 E_3 ，下标“3”表示 MMC3，下标“12”表示 MMC1 和 MMC2，下标“45”表示 MMC4 和 MMC5。

由式(1)可知 MMC1、MMC2、MMC4、MMC5 的功率大小与每个 MMC 的电压值成正比，因此

$$P_1^{1-3} = P_5^{1-3} = -\frac{1}{2} \frac{E_3 - E_2}{E_3 - E_1} P_{dc1} \left(1 - \frac{E_1}{E_3}\right) \quad (4)$$

$$P_2^{1-3} = P_4^{1-3} = -\frac{1}{2} \frac{E_2 - E_1}{E_3 - E_1} P_{dc1} \left(1 - \frac{E_1}{E_3}\right) \quad (5)$$

将从 E_2 传输到 E_3 的功率表示为 P_{dc2} ，这部分直流功率可根据上述分析同理得到

$$\begin{cases} P_2^{2-3} = \frac{E_2 - E_1}{2E_2} P_{dc2} \left(1 - \frac{E_2}{E_3}\right) \\ P_3^{2-3} = \frac{E_1}{2E_2} P_{dc2} \left(1 - \frac{E_2}{E_3}\right) \\ P_4^{2-3} = \frac{E_2 - E_1}{2E_2} P_{dc2} \left(1 - \frac{E_2}{E_3}\right) \end{cases} \quad (6)$$

3 多端口 DC/DC 能源路由器的故障分析与全桥比例设计

3.1 多端口 DC/DC 能源路由器中 MMC 的工作电压需求

为了使能源路由器具有无闭锁穿越直流故障的能力，且实现非故障侧仍然稳定运行，首先分析各变换器的运行电压需求，之后根据此需求进行子模块全桥模块比例设计。本文通过分析最严重的双极性短路故障情况，计算多端口 DC/DC 能源路由器的运行电压需求范围。

由图 1 分析可知，连接 E_3 和 E_2 电网的 MMC1 和 MMC5 的正常工作电压为 $(E_3 - E_2)/2$ ，连接 E_1 和 E_2 电网的 MMC2 和 MMC4 的正常工作电压为 $(E_2 - E_1)/2$ ，而两端连接 E_1 电网的 MMC3 的正常工作电压为 E_1 。

E_1 侧发生双极性短路故障时的工作电压如图 4 所示，分析图 4 可知，当多端口 DC/DC 能源路由器的低压 (E_1) 侧发生双极性短路故障时，MMC3 工作电压由 E_1 降为 0，MMC2 和 MMC4 的工作电压则由 $(E_2 - E_1)/2$ 上升至 $E_2/2$ 以维持 MMC1 和

MMC5 的工作电压不变。

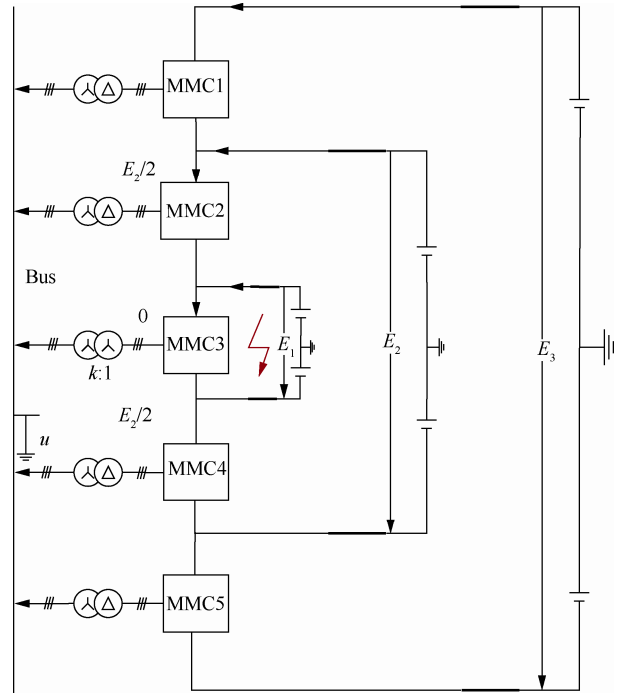


图 4 E_1 侧发生双极性短路故障时的工作电压

E_2 侧发生双极性短路故障时的工作电压如图 5 所示，分析图 5 可知，当多端口 DC/DC 能源路由器的 E_2 侧发生双极性短路故障时，为了维持 MMC3 在 E_1 工作电压稳定运行，MMC2 和 MMC4 的工作电压则由 $(E_2 - E_1)/2$ 下降至 $-E_1/2$ ，而 MMC1 和 MMC5 的工作电压则提升至 $E_3/2$ 。

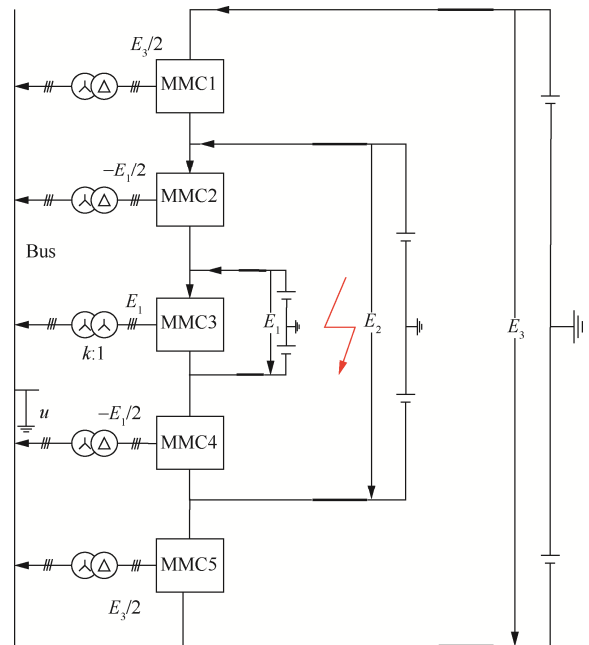


图 5 E_2 侧发生双极性短路故障时的工作电压

$$\begin{cases} V_{p,n}^{\max} = \frac{E_3}{4} + \frac{E_3 - E_2}{4} = \frac{2E_3 - E_2}{4} \\ V_{p,n}^{\min} = -\frac{E_2}{4} - \frac{E_3 - E_2}{4} = -\frac{E_3}{4} \end{cases} \quad (11)$$

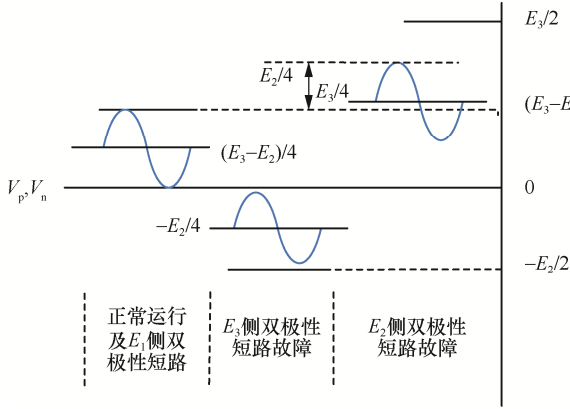


图7 MMC1和MMC5的不同工况工作电压

由式(11)可以分别求得 MMC1 和 MMC5 中 FBSM 和 HBSM 的个数分别为

$$\begin{cases} N_F = \frac{E_3}{4V_{cn,15}} \\ N_H = \frac{E_3 - E_2}{4V_{cn,15}} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $V_{cn,15}$ 指 MMC1 和 MMC5 的子模块额定电压。

当能源路由器 E_2 、 E_3 侧的电压变比 $k > 3$ 时, 电流为单向流通, 此时, HBSM 无法正常充/放电。因此, 若要满足表 1 的工作电压需求, MMC1 和 MMC5 中的额外子模块必须全部为 FBSM。据此设计的 MMC1 和 MMC5 的子模块数目为

$$\begin{cases} N_F = \frac{3E_3 - E_2}{8V_{cn,15}} \\ N_H = \frac{1E_3 + E_2}{8V_{cn,15}} \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)和式(13)综合分析可得, 当能源路由器中的 MMC1 和 MMC5 子模块数目如式(14)和式(15)所示时, 可以使能源路由器具备无闭锁穿越直流故障的能力。

$$N_F = \begin{cases} \frac{E_3}{4V_{cn,15}}, k \leq 3 \\ \frac{3E_3 - E_2}{8V_{cn,15}}, k > 3 \end{cases} \quad (14)$$

$$N_H = \begin{cases} \frac{E_3 - E_2}{4V_{cn,15}}, k \leq 3 \\ \frac{1E_3 + E_2}{8V_{cn,15}}, k > 3 \end{cases} \quad (15)$$

以同样的分析方法分析 MMC2 和 MMC4, 设计后的能源路由器中的 MMC2 和 MMC4 子模块数目应为

$$N_F = \begin{cases} \frac{E_2}{4V_{cn,24}}, k \leq 3 \\ \frac{3E_2 - E_1}{8V_{cn,24}}, k > 3 \end{cases} \quad (16)$$

$$N_H = \begin{cases} \frac{E_2 - E_1}{4V_{cn,24}}, k \leq 3 \\ \frac{1E_2 + E_1}{8V_{cn,24}}, k > 3 \end{cases} \quad (17)$$

4 多端口 DC/DC 能源路由器的控制策略

4.1 多端口 DC/DC 能源路由器的整体控制策略

多端口 DC/DC 能源路由器整体控制框图如图 8 所示, 主要包含一个整体控制器以及对应 5 个 MMC 的独立控制器。可实现本文提出的多端口 DC/DC 能源路由器在正常工况和故障状态下的稳定运行。

本控制策略要实现多端口能源路由器在正常工况下的稳定运行、运行时波形较好、遇到扰动调整较快以及遇到直流故障时无闭锁穿越直流故障等目的。

图 8 中左侧方框内所示为本文提出的整体控制器, 左侧方框的左侧部分为整体控制器的各种输入量, P_{ref} 为能源路由器的有功功率参考值, V_1 、 V_2 、 V_3 为能源路由器连接的电网 E_1 、 E_2 、 E_3 的电压, I_1 、 I_2 、 I_3 为能源路由器连接的电网 E_1 、 E_2 、 E_3 的电流。

右侧部分为整体控制器的输出量, 主要是 MMC2、MMC3 和 MMC4 的直流电流参考值以及 MMC1 和 MMC5 的交流电压等。整体控制器的主要作用是根据多端口 DC/DC 能源路由器的不同工况生成 MMC2、MMC3 和 MMC4 的电流参考值, 再通过控制 MMC 来实现有功功率控制或穿越直流故障等目的。

整体控制器的工作原理如下。在正常工作状态下, MMC2、MMC3 和 MMC4 的直流侧电流参考值将由左侧整体控制器根据设定的有功功率参考

值计算得出；而当系统检测到直流故障时，故障侧的直流电流参考值会被系统直接设置为 0。

除了整体控制器，本文还针对 5 个 MMC 提出了独立控制器，从图 8 右侧可以看出，每个 MMC 有两个控制器，分别用于控制两个物理量，这主要根据混合 MMC 的控制原理设计^[10]，混合型 MMC 包含直流控制回路和交流控制回路两个独立解耦控制环。要使混合型 MMC 稳定运行，首先要保证桥臂电容电压的动态平衡，因此必须有用于控制桥臂电容电压稳定的控制回路。除此之外，混合型 MMC 的另一个控制回路则由能源路由器的特点要求来决定。

在多端口（三端口）DC/DC 能源路由器中，设置 MMC1 和 MMC5 维持公共交流母线电压的稳定，即使用 MMC1 和 MMC5 中的交流控制回路控制交流母线电压。而 MMC1 和 MMC5 的直流环则用于控制桥臂电容电压的动态平衡以维持 MMC 的稳定运行。至于 MMC2、MMC3 和 MMC4，将使用直流控制回路控制直流电流，同时本质上也是控制多端口能源路由器的有功功率，使用交流控制回路维持桥臂电容电压的平衡稳定。

4.2 多端口 DC/DC 能源路由器的独立控制策略

混合型 MMC 的具体控制框图如图 9 所示，由

图 9 可以看出，混合型 MMC 具备子模块平均电容电压控制回路、交流控制回路、无功外环控制回路、直流外环控制回路和环流抑制控制回路，通过这些控制可实现 MMC 的交/直流解耦控制。与常规半桥 MMC 控制策略相比，交流控制回路采用相似的 PI 闭环控制，只不过输入量变为子模块平均电容电压。环流抑制控制策略也相同，不同的是混合型 MMC 比半桥型 MMC 增加了一条直流控制回路，输入量为有功功率参考值或直流电压参考值，该控制回路可以根据控制量选择直流电压控制或有功功率控制。

这种交/直流解耦控制使得能源路由器具备了无闭锁穿越直流故障的能力。当直流侧发生故障后，由于直流侧与交流侧控制回路相互独立，因此直流侧故障不会影响交流侧回路的正常运行。而且，额外增加的直流侧控制回路可以迅速抑制故障电流，使得直流侧故障可以迅速得到控制与清除。

由上述分析可以得出，使用混合型 MMC 可以满足多端口能源路由器在多种工况下的电压需求，而且使用的交直流解耦控制可以将直流侧故障与交流侧分隔，在交流侧正常稳定运行的情况下迅速抑制直流侧故障电流，清除直流侧故障，使得

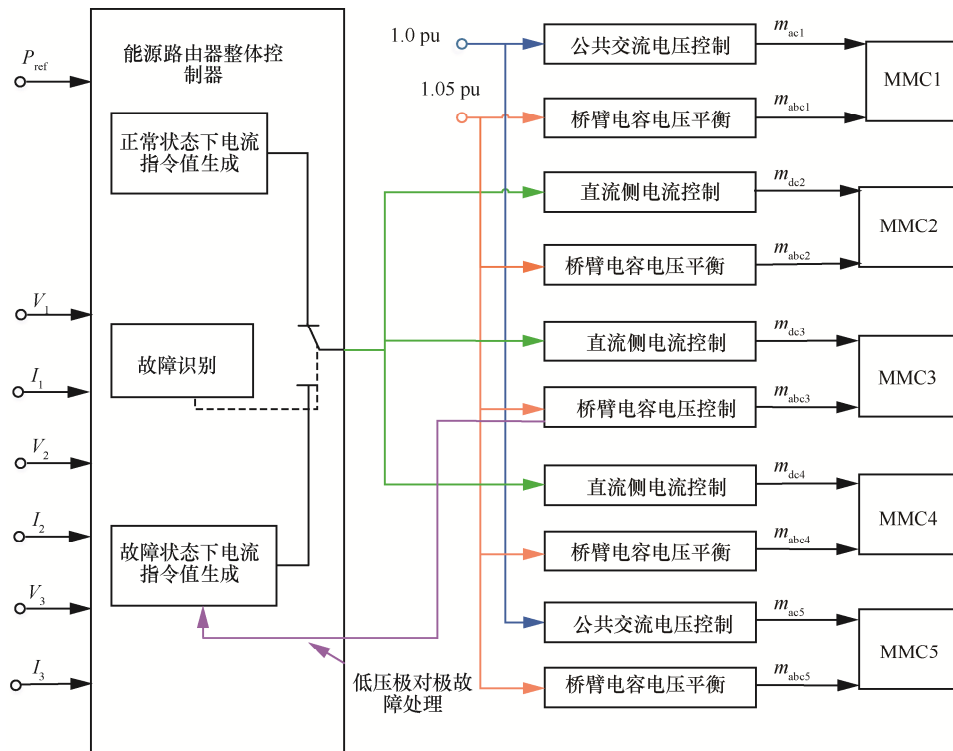


图 8 多端口 DC/DC 能源路由器整体控制框图

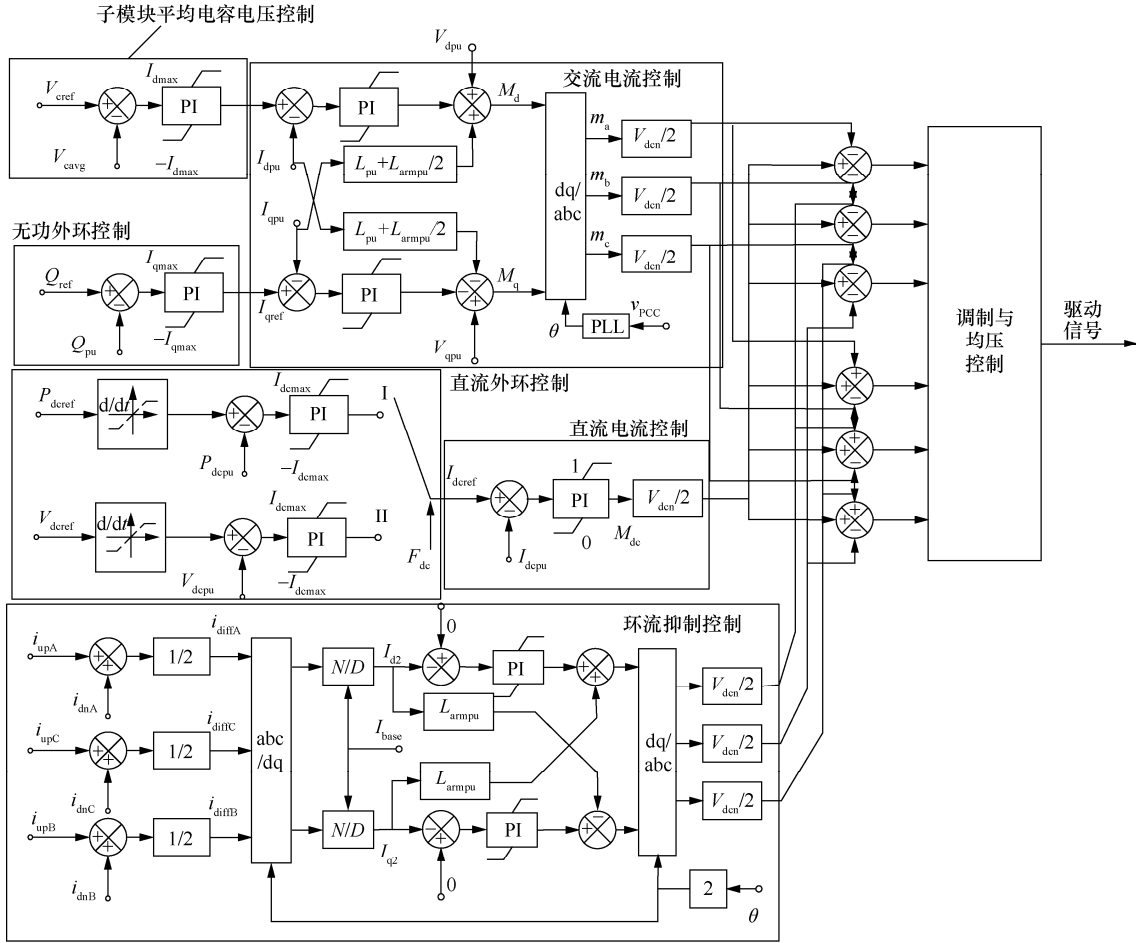


图 9 混合型 MMC 的具体控制框图

多端口能源路由器具备了无闭锁穿越直流故障的可能性。

多端口 DC/DC 能源路由器的控制流程如图 10 所示。

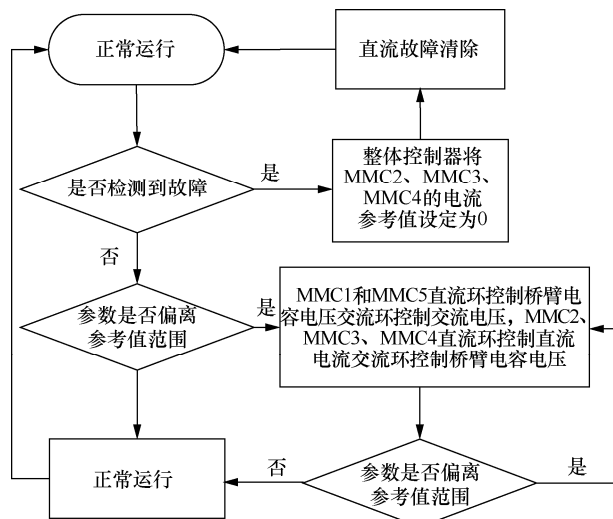


图 10 多端口 DC/DC 能源路由器的控制流程

当系统正常运行时,选择一组 MMC(如 MMC1 和 MMC5)来控制整个能源路由器的交流电压稳定,其他组 MMC 根据功率指令值计算出 MMC2、MMC3 和 MMC4 的电流参考值控制直流侧功率传输。当系统检测到故障时,整体控制器会将 MMC2、MMC3 和 MMC4 的电流参考值设定为 0 来穿越直流故障。独立控制器中交流控制回路用于控制交流母线电压,直流控制回路用于控制桥臂电容电压。由于使用了交/直流解耦控制,因此当直流侧发生故障时,交流侧可正常运行。

5 仿真实证

为了验证本文提出的多端口 DC/DC 能源路由器技术的可行性以及控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了一个多端口 DC/DC 能源路由器的测试模型,多端口 DC/DC 能源路由器的参数如表 2 所示,部分参数借鉴文献[15-16]的方法选取,每个 MMC 中的 FBSM 和 HBSM 数

表 2 多端口 DC/DC 能源路由器的参数

系统参数	MMC1 和 MMC5	MMC2 和 MMC4	MMC3
MMC 额定直流电压/kV	8 (所连接的直流电网的额定电压 E_1 为 80 kV)	7 (所连接的直流电网的额定电压 E_2 为 64 kV)	50 (所连接的直流电网的额定电压 E_3 为 50 kV)
MMC 额定有功功率/MW	15	6.562 5	34.375
每桥臂子模块数目	4 FBSMs+2 HBSMs	4 FBSMs+2 HBSMs	6 FBSMs+2 HBSMs
额定子模块电容电压/kV	2	1.75	6.25
子模块电容值/ μ F	1 000	1 000	450
桥臂电抗器值/H	0.048 8	0.048 8	0.09

量由第 2.2 节中的方法求得。

对正常运行时负载发生改变以及出现直流故障两种情况进行仿真。

5.1 负载发生改变的仿真

设定 MMC3 在 0.5 s 时 A 相负载变为 0, MMC3 A 相变负载仿真波形如图 11 所示。图 11(a)和图 11(c)分别是 MMC3 (故障端 E_1 所连接的 MMC) A 相上、下桥臂子模块电容电压和电流波形, 图 11(b)是 MMC3 内部交流电压波形。可以看出 0.5 s 时电压电流有波动, 经过 0.5 s 的调整, 波动减小到 5% 以内, 说明本控制方法对负载变化情况具有良好的调控作用。

5.2 出现直流故障的仿真

设定在 1.5 s 时 E_1 侧发生直流侧短路故障, 多端口 DC/DC 能源路由器故障穿越仿真波形如图 12 所示。由图 12 可以看出, 1.5 s 时系统切换至故障穿越模式, 2 s 时故障电流衰减近似为 0, 故障被隔离, 3 s 时直流故障清除, 系统恢复正常运行, 即控制策略成功实现系统无闭锁穿越直流故障, 体现了控制策略的有效性。

从图 10(a)可以看出, E_1 侧发生故障不会对 E_2 和 E_3 的电压造成大的扰动, 在整个仿真过程中, E_2 和 E_3 的电压保持稳定, 证明了控制策略故障隔离能力的有效性。图 10(b)为 MMC3 (故障端 E_1 所

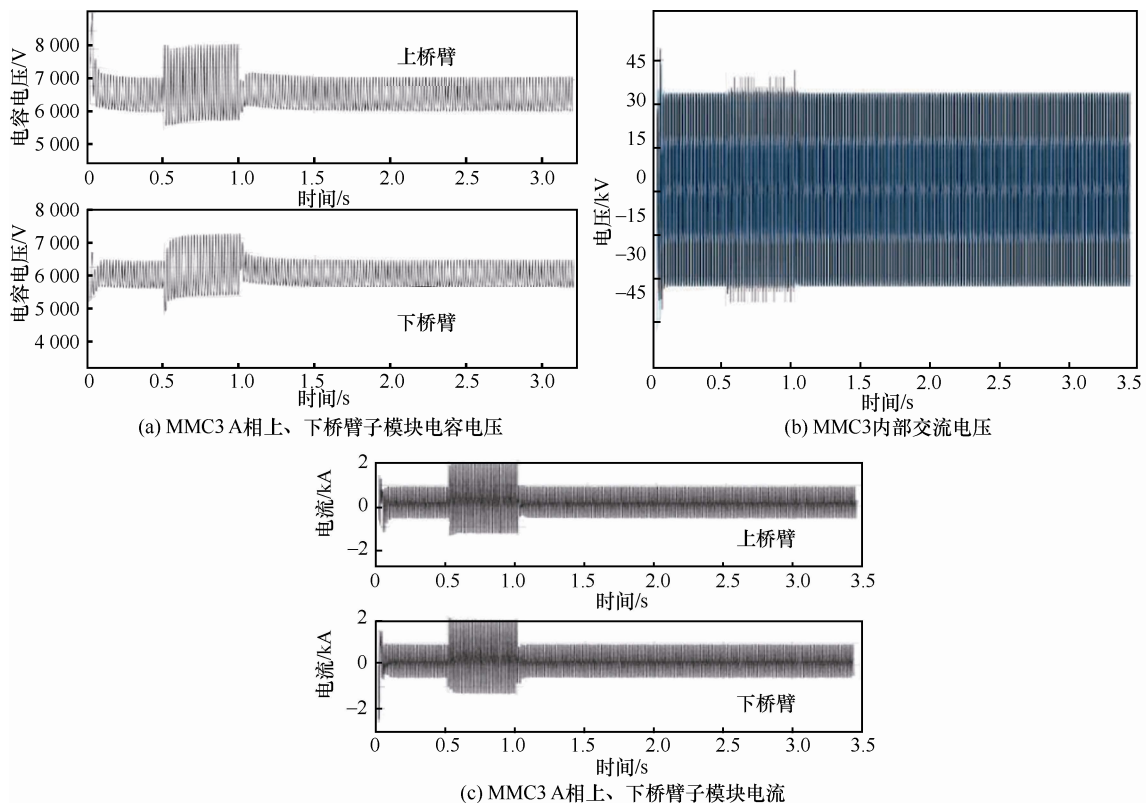


图 11 MMC3 A 相变负载仿真波形

连接的 MMC) A 相上桥臂子模块电容电压波形, 图 10(c)为 MMC3 A 相上桥臂子模块电流波形, 可以看出, 电压电流波形在仿真过程中比较稳定, 遇到故障也可以快速得到控制并恢复。

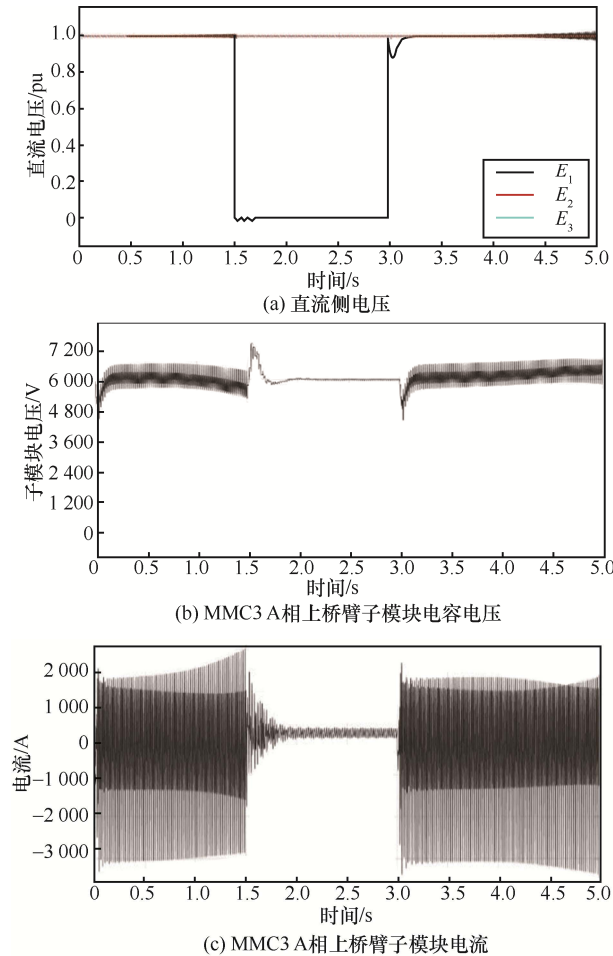


图 12 多端口 DC/DC 能源路由器故障穿越仿真波形

MMC3 传递的有功功率 P 和无功功率 Q 的波形如图 13 所示, 由图 13 可以看出, 与前文推导相符, 当遇到故障时, 系统维持 0 功率传输, 此时无功功率会有少许增加, 故障清除时有功功率和无功功率恢复正常。

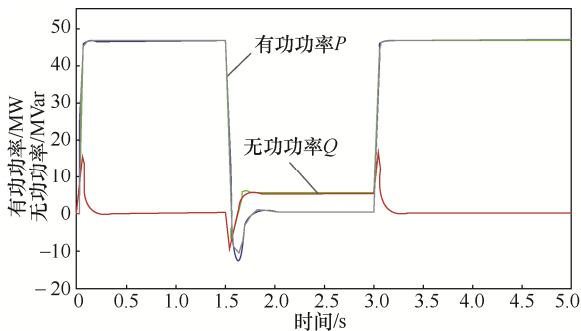


图 13 MMC3 传递的有功功率和无功功率的波形

6 结束语

本文提出了一种具备无闭锁穿越故障能力的多端口 DC/DC 能源路由器, 通过对 MMC 中子模块的全桥比例设计以及控制策略的改进, 使得该路由器在保留低成本、低功耗的优势的基础上, 具备无闭锁穿越直流故障的能力, 并搭建了相应的仿真模型。所提出的多端口 DC/DC 能源路由器技术在未来的能源互联网搭建、柔性直流电网新能源并网方面有极高的研究价值和应用前景。后续将继续针对本能源路由器应用于中低压变比的新能源并网的直流系统方面进行深入研究。

参考文献:

- [1] GLOWACKI-DUDKA M. Book review: the third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[J]. Adult Learning, 2012, 24(1): 50-51.
- [2] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
MA Z, ZHOU X X, SHANG Y W, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy Internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.
- [3] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17, 24.
TANG G F, LUO X, WEI X G. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17, 24.
- [4] 李兴源, 曾琦, 王渝红, 等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
LI X Y, ZENG Q, WANG Y H, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [5] 李国庆, 边竟, 王鹤, 等. 直流电网潮流分析与控制研究综述[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1067-1078.
LI G Q, BIAN J, WANG H, et al. Review on DC grids power flow analysis and control[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1067-1078.
- [6] 林卫星, 文劭宇, 程时杰. 多端口直流直流自耦变压器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 727-734.
LIN W X, WEN J Y, CHENG S J. Multiport DC-DC autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 727-734.
- [7] FALCONES S, AYYANAR R, MAO X L. A DC-DC Multiport-converter-based solid-state transformer integrating distributed generation and storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2192-2203.
- [8] SU G J, PENG F Z. A low cost, triple-voltage bus DC-DC converter for automotive applications[C]//20th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2005: 1015-1021.

- [9] LIN W X, JOVCIC D. Reconfigurable multiphase multi GW LCL DC hub with high security and redundancy[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 110: 104-112.
- [10] JOVCIC D, LIN W X. Multiport high-power LCL DC Hub for use in DC Transmission grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 760-768.
- [11] ZHU Y L, SHI S H, CHENG S, et al. Topology, modulation and control strategy of a multi-port DC/DC converter based on modular multilevel converter[C]//2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2019: 599-603.
- [12] AL-ATRASH H, BATARSEH I. Boost-integrated phase-shift full-bridge converter for three-port interface[C]//2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. IEEE, 2007: 2313-2321.
- [13] RAY O, PRASAD J A, MISHRA S. A multi-port DC-DC converter topology with simultaneous buck and boost outputs[C]//2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE, 2013: 1-6.
- [14] ZENG R, XU L, YAO L Z, et al. Design and operation of a hybrid modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1137-1146.
- [15] 李梦柏. 应用于新能源直流汇集与传输的直流—直流变压器拓扑研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
LI M B. Research on DC-DC transformer topology applied to new energy DC collection and transmission[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [16] 李梦柏, 向往, 左文平, 等. 具备无闭锁穿越直流故障能力的直流自耦变压器[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 82-88.
LI M B, XIANG W, ZUO W P, et al. DC autotransformer with the ability of passing through DC fault without blocking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 82-88.

[作者简介]



马文忠 (1968-), 男, 山东东营人, 中国石油大学 (华东) 教授, 主要研究方向为能源互联网与智能电网技术等。



李冠成 (1995-), 男, 山东淄博人, 中国石油大学 (华东) 新能源学院硕士生, 主要研究方向为多端口 DC/DC 能源路由器、直流自耦变压器等。



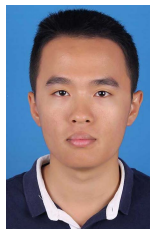
张奎同 (1983-), 男, 山东济宁人, 兖矿集团有限公司新能源事业部高级工程师, 主要研究方向为煤化工技术。



杨淑娟 (1987-), 女, 山东济宁人, 山东交通职业学院副教授, 主要研究方向为电力电子技术、船舶电气等。



魏孟迪 (2000-), 男, 山东滨州人, 中国石油大学 (华东) 新能源学院本科生, 主要研究方向为电力系统自动化、电力电子技术。



唐毓振 (1999-), 男, 山东烟台人, 中国石油大学 (华东) 新能源学院本科生, 主要研究方向为电力系统自动化、电力电子技术。



宋玉成 (2001-), 男, 山东德州人, 中国石油大学 (华东) 理学院本科生, 主要研究方向为电力系统自动化、电力电子技术。



董磊 (1978-), 男, 山东东营人, 中国石油大学 (华东) 新能源学院讲师, 主要研究方向为能源互联网与智能电网技术等。