

引用格式:江万里,王若愚,李嘉靓,等.海上风电接入柔直系统的交流故障机理及影响分析[J].南方能源建设,2025,12(1):91-99. JIANG Wanli, WANG Ruoyu, LI Jiajing, et al. AC fault mechanism and impact analysis of offshore wind power connected to flexible and direct systems [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 91-99. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-268.

# 海上风电接入柔直系统的交流故障机理及影响分析

江万里<sup>1</sup>, 王若愚<sup>1</sup>, 李嘉靓<sup>1</sup>, 梁靖仪<sup>2,✉</sup>

(1. 南方电网深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的]为了更好地掌握海上风电接入系统故障特性,进行了海上风电接入系统交流故障特征的影响分析。[方法]给出了海上风电并网输电系统拓扑分析和海上风电电气结构工作控制原理分析,其中包括PMSG工作控制原理分析,柔直输电系统的拓扑及原理分析,海上换流站工作控制原理分析,陆上换流站工作控制原理分析,从不对称故障与对称故障2个方面开展了海上风电接入系统的故障特征机理分析。[结果]建立了基于PSCAD的海上风电经柔直送出的仿真模型并进行了验证分析,通过单相接地故障和三相接地故障仿真分析对所提出机理分析的正确性和普遍适用性进行了验证。[结论]仿真结果验证了故障特征机理分析的正确性,对称分量法能够满足于在含电力电子设备接入系统下的故障分析,不对称故障时,两侧的同相短路电流有一定的相角差,柔直侧的负序电流最大,风场侧的短路电流整体较小,对称故障时,柔直侧、风场侧电流分量中仅有正序电流,两侧的同相短路电流的相位几乎趋于一致,均呈现幅值受限特征。

**关键词:** 海上风电; 故障特性; 仿真模型; 不对称故障; 对称故障

DOI: 10.16516/j.ceec.2023-268

文章编号: 2095-8676(2025)01-0091-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2023-268

中图分类号: TK89; TM74



论文二维码

## AC Fault Mechanism and Impact Analysis of Offshore Wind Power Connected to Flexible and Direct Systems

JIANG Wanli<sup>1</sup>, WANG Ruoyu<sup>1</sup>, LI Jiajing<sup>1</sup>, LIANG Jingyi<sup>2,✉</sup>

(1. China Southern Power Grid Shenzhen Power Supply Bureau, Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Objective] In order to better understand the fault characteristics of offshore wind power access system, the impact analysis of AC fault characteristics of offshore wind power access system is carried out. [Method] The topology analysis of grid-connected transmission system of offshore wind power and the work control principle analysis of offshore wind power electrical structure were presented, including the work control principle analysis of PMSG, the topology and principle analysis of flexible and direct transmission system, the work control principle analysis of offshore converter station, the work control principle analysis of onshore converter station, and the work control principle analysis of offshore converter station. The fault characteristics and mechanism of offshore wind power access system were analyzed from two aspects: asymmetric fault and symmetric fault. [Result] The simulation model of PSCAD-based offshore wind power transmission through flexible direct transmission is established and verified. The correctness and universal applicability of the proposed mechanism analysis are verified through the simulation analysis of single-phase grounding fault and three-phase grounding fault. [Conclusion] The simulation results verify the correctness of the fault characteristic mechanism analysis. The symmetric component method can be satisfied with the fault analysis in the system with power electronic equipment access. In the case of asymmetric fault, the in-phase short-circuit current on both sides has a certain phase Angle difference, the negative sequence current on

收稿日期: 2023-09-22 修回日期: 2023-11-15

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目“分布式海上风电场柔性直流输电关键设备的研制”(2021B0101230001)

the soft straight side is the largest, and the short-circuit current on the wind side is generally small. There is only positive sequence current in the soft direct side and wind field side, and the phase of in-phase short-circuit current on both sides is almost the same, showing amplitude limitation.

**Key words:** offshore wind power; fault characteristics; simulation model; asymmetric fault; symmetric fault

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

海上风电作为储量丰富且未充分利用的清洁能源,对于我国实现碳达峰、碳中和具有重要意义。海上风电成长相当迅速,已成为可再生能源的主要来源。国际能源署预计,全球海上风电市场将以每年 13% 的速度增长,预计到 2040 年,全球海上风电装机容量将至少增长 15 倍,业务规模将达到 1 万亿美元,与天然气和燃煤发电的资本支出相当。然而随着海上风电并网容量的不断增加,其输出功率的强随机性和波动性给电网的安全稳定运行带来了前所未有的困难和挑战<sup>[1-3]</sup>。

截至目前,国内外的研究焦点一般聚焦于柔直侧近区交流系统的故障分析<sup>[4-6]</sup>和柔直系统换流器阀侧故障下的分析<sup>[7-8]</sup>。文献 [9] 分析了 MMC (Modular Multilevel Converter, 模块化多电平换流器) 近区下三相短路故障下的故障特征,得到其输出短路电流值与其控制参数息息相关的结论。文献 [10] 分析了 MMC 提供的短路电流由正、负、零序电流组成。文献 [11] 研究了检测零序电压分量来减小直流过电压程度的方法。文献 [12] 提出 MMC 的桥臂电压会因为电网侧发生故障而振荡,负序及零序功率对其影响较大。文献 [13] 提出了一种通过降低送

端故障期间无源网络吸收的功率达到故障穿越的方法。文献 [14] 提出了一种投入自调控耗能电阻与风电场输送功率协调配合的故障穿越方法。文献 [15] 设计了适用于不同工况下的柔性泄能电阻投切控制方法。

文章进行了海上风电接入系统交流故障特征的影响分析,给出了海上风电并网系统拓扑及控制原理,从不对称故障与对称故障 2 个方面开展了海上风电接入系统的故障特征机理分析,建立了基于 PSCAD 的海上风电经柔直送出仿真模型并进行了验证分析,验证了所提出机理分析的正确性和普遍适用性。

## 1 海上风电并网系统拓扑及控制原理分析

### 1.1 海上风电并网输电系统拓扑分析

经过调研统计分析<sup>[16-18]</sup>,我国海上风电并网方式主要有高压交流、柔性直流、分频送出 3 种方式,拓补图如图 1 所示。文章主要对柔性直流方式进行分析。

海上风电场并网输电系统由风电机组、集电系统、升压站和输电系统 4 个部分组成<sup>[19-21]</sup>,其中风电机组是的目的于获得最大的风能,其特定的接线拓补结构如图 2 所示。风电机组经过箱变升压后接入中压电缆,通过集电系统汇集电能至海上升压站。海上升压站是连接中压集电网络与高压输电系统的

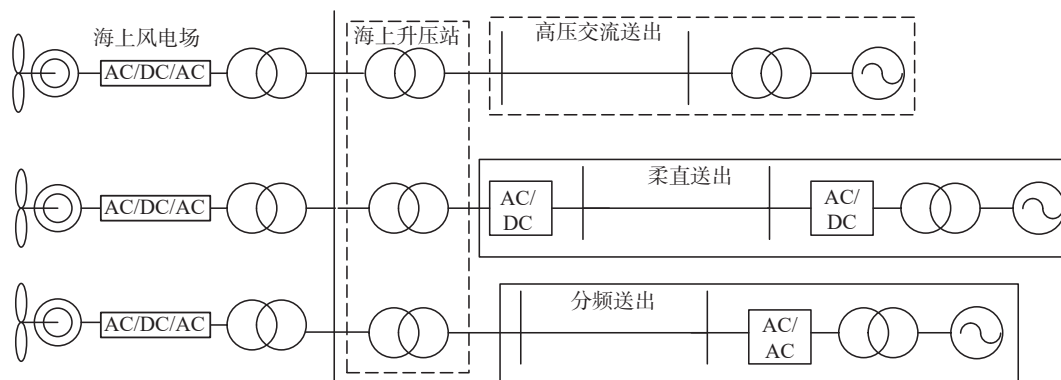


图 1 海上风电输电系统不同拓扑

Fig. 1 Different topologies of offshore wind power transmission systems

关键部分。输电系统是指连接海上升压换流平台和陆上主网连接点之间的高压电气网络。文章主要对链型方式进行分析。

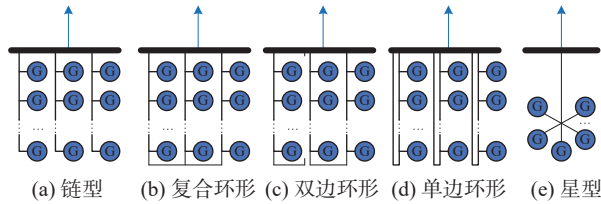


图 2 海上风电机组连接方式

Fig. 2 Connection method of offshore wind turbine group

## 1.2 海上风电电气结构工作控制原理分析

### 1.2.1 PMSG 工作控制原理分析

本节中因考虑到海上风电场特性的准确描述, 需将海上风电场的永磁直驱风机进行等值。其接入柔直系统部分的电路结构拓扑如图 3 所示, 由永磁直驱风机(PMSG)、机侧换流器(WFVSC)、网侧换流器(GSVSC)、滤波器及箱变组成。

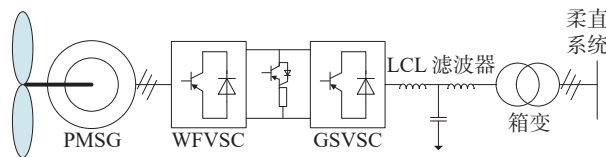


图 3 永磁风机并网接线

Fig. 3 Grid-connected connection of permanent magnet air unit

当海上风电场的所有风机等值后, 其对应的风电场有功功率  $P_z$ 、额定电流  $I_z$  计算如下式所示:

$$\begin{cases} P_z = \sum_{i=1}^n P_{di} \\ I_z = \sum_{i=1}^n I_{di} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$P_{di}$  —— 单个风机  $i$  的有功功率(W);

$I_{di}$  —— 单个风机  $i$  的额定电流(A)。

机侧换流器、网侧换流器均采用双闭环控制方式, 对应控制结构图如图 4 所示, 机侧换流器的控制方式采取的是实时跟踪风机出力的有功功率值, 网侧换流器的控制方式采取的是定风机的直流电压和无功功率, 实现功率平衡及传递风能的功能。

### 1.2.2 柔直输电系统的拓扑及原理分析

柔直两端的换流站由用半桥型子模块连接而成, 其运行状态由子模块的投切状态组合来控制。具体结构图如图 5 所示, 子模块是基于  $T_1$ 、 $T_2$  的组合, 通过  $T_1$ 、 $T_2$  的通断组合设置, 子模块的输出工作状态对应不同, 主要有 3 种状态:

子模块是基于  $T_1$ 、 $T_2$  的组合, 通过  $T_1$ 、 $T_2$  的通断组合设置, 子模块的输出工作状态对应不同, 主要有 3 种状态:

- 1) 闭锁状态。  $T_1$ 、 $T_2$  均关断, 直流电容  $C$  被旁路, 子模块输出电压为 0。
- 2) 投入状态。  $T_1$  开通、 $T_2$  关断, 子模块输出电压为直流电容电压。
- 3) 切除状态。  $T_1$  关断、 $T_2$  开通, 子模块输出电压为 0。

### 1.2.3 海上换流站工作控制原理分析

海上换流站作为核心的连接设备, 其目标在于保持海上风电场接入的电压和频率稳定, 因此其控制方式是  $v$ - $f$  控制。海上换流站控制方式具体如图 6 所示, 风电场交流电压参考值作为  $d$  轴的前馈环节, 改变其值起到调整风电场并网母线电压的大小的功能, 且相位也可设置输入, 最终实现风电场交流电压和频率的稳定可控。故障后会采取降低电压

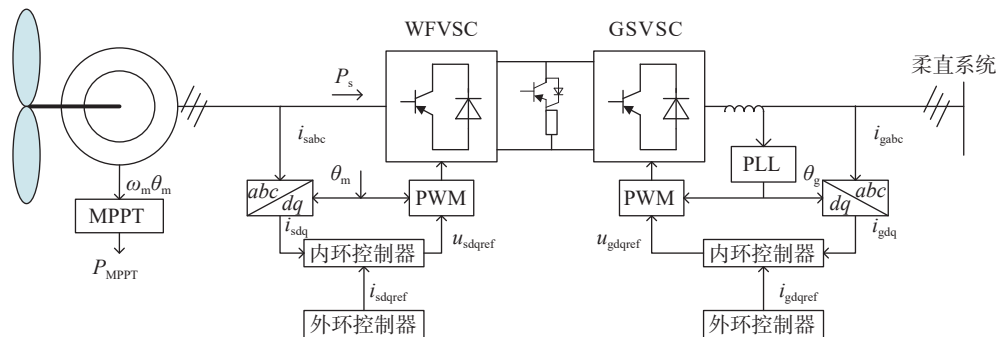


图 4 风电场接入下的整体控制结构图

Fig. 4 Overall control structure diagram of wind farm access

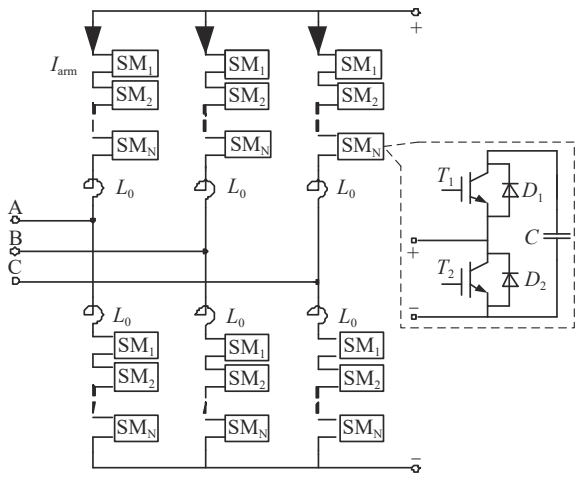


图 5 换流站结构图

Fig. 5 Structure diagram of converter station

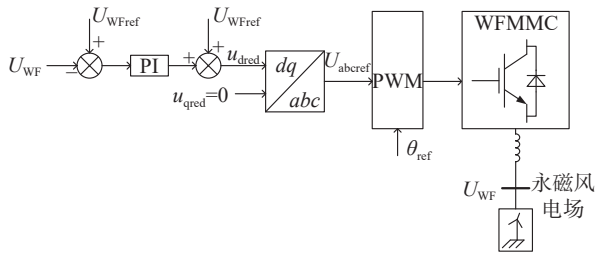


图 6 海上换流站控制方式

Fig. 6 Control mode of marine converter station

控制电流的策略，但仍采用电压方式。

### 1.2.4 陆上换流站工作控制原理分析

陆上换流站采用双闭环矢量控制策略，在稳态时保持柔性直流输电系统直流电压稳定，输出的无功功率为 0。

总体而言，海上风电电气控制分析表明，在交流故障后，风电机组换流器呈现受控电流源特征，柔直换流器呈现受控电压源特征，因此将基于此特征分析二者的故障电流。

## 2 海上风电接入系统的故障特征机理分析

### 2.1 不对称故障机理分析

通常当海上风电经柔直输电送出时，会把柔直换流器当作电压源控制。且换流变压器存在着隔离零序电流的功能，因此当发生不对称故障时，柔直换流器提供的短路电流可由式(2)表示。

$$i_{r\varphi} = \frac{E_r(t) \cos(\omega t + \theta_\varphi)}{Z_d} + \frac{E_r(t) \cos(\omega^- t + \theta_{\varphi^-})}{Z_d} \quad (2)$$

式中：

$E_r(t)$  ——柔直换流器内电势(V)；

$\omega^-$  ——负序角频率；

$\theta_\varphi$  ——正序电流相角(°)；

$\theta_{\varphi^-}$  ——负序电流相角(°)；

$Z_d$  ——等效阻抗(Ω)。

本节主要以单相接地故障作为不对称故障的典型进行分析，图 7 给出了单相接地故障的正序、负序、零序下的复合序网。

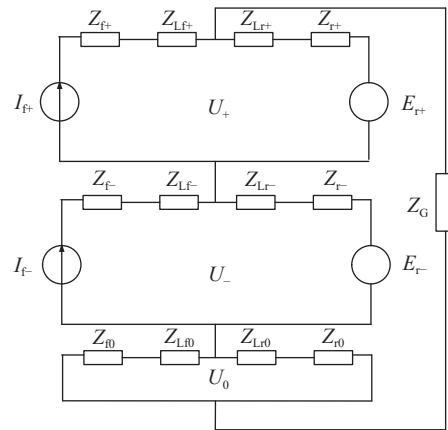


图 7 单相故障复合序网

Fig. 7 Single-phase fault complex sequence network

由图 7 可知，因风电场侧实施了抑制负序电流的方案，在单相接地故障发生后，主要的负序通路是经柔直换流器提供，柔直换流器提供的短路电流解析式为：

$$i_{r\varphi} = \frac{E_r \cos(\omega t + \theta_\varphi)}{Z_+ + Z_- + Z_0} + \frac{E_r \cos(\omega^- t + \theta_{\varphi^-})}{Z_+ + Z_- + Z_0} + |i_{i\varphi}| \cos(\omega^- t + \theta_{\varphi^-}) = A_1 \cos(\omega t + \theta_\varphi) + (A_1 + |i_{i\varphi}|) \cos(\omega^- t + \theta_{\varphi^-}) \quad (3)$$

式中：

$A_1$  ——单相接地故障下柔直换流器的电流幅值(A)；

$i_{i\varphi}$  ——风电场侧的短路电流(A)。

经对式(3)分析可知，柔直侧的短路电流由 2 部分影响：(1)换流站产生的电压；(2)对侧风电场侧的短路电流。并且柔直侧的短路电流由正序、负序短路电流组成，其幅值高于风电场侧的短路电流，还存在着相角差。

### 2.2 对称故障机理分析

当风电场的并入交流系统发生对称故障时，其

柔直换流器侧的短路电流可由式(4)表示:

$$i_{np} = \frac{E_w(t) \cos(\omega t + \theta_\varphi)}{Z_+} \quad (4)$$

经对式(4)分析可知, 柔直换流器与风场只提供正序电流, 因此两侧同相短路电流的相位几乎一致, 且该交流线路处于风电场送出侧与柔直接入侧, 风场侧及柔直侧均有换流器, 其通流能力有限, 所以两侧短路电流会出现幅值受限的特征。

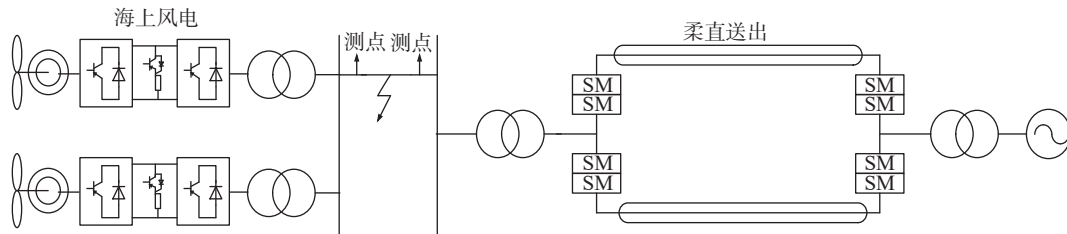


图 8 海上风电经柔直送出仿真示意图

Fig. 8 Simulation diagram of offshore wind power transmission through VSC-HVDC

### 3.1 不对称故障仿真分析

基于图 8 的仿真模型进行交流线路单相接地故障仿真, 仿真结果如图 9—图 11 所示。其中图 9 为单相故障下柔直侧及风场侧电压及风场输出功率特性波形, 图 9(a)中 1~1.2 s 处柔直侧的交流母线电压因单相接地故障而发生暂降, 图 9(b)中风电场的输出功率也存在一定的波动。

对比图 10(a)与图 11(a)的波形可知, 两侧的同相短路电流有一定的相角差。对比图 10(b)与图 11(b)的波形可知, 柔直侧电流分量中有正、负、零序电流, 这也是导致两侧短路电流的原因。

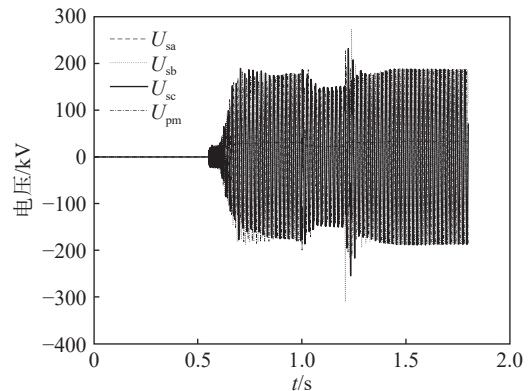
柔直侧的负序电流满足式(3)所示约束, 其负序电流幅值最大, 风场侧的短路电流整体较小, 验证了理论推导的正确性。

### 3.2 对称故障仿真分析

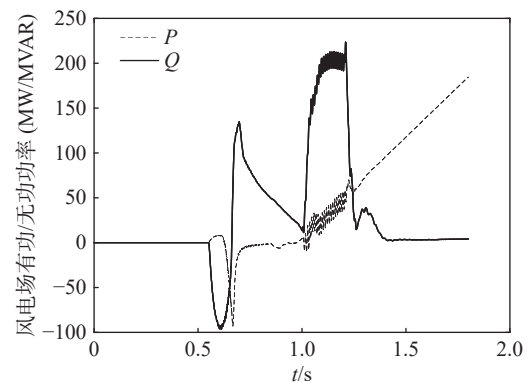
基于图 8 的仿真模型进行交流线路三相接地故障仿真, 仿真结果如图 12—图 14 所示。其中图 12 为三相故障下柔直侧及风场侧电压及风场输出功率特性波形, 图 12(a)中 1~1.2 s 处柔直侧的交流母线电压因三相接地故障而导致波形幅值下降比例超 85%, 图 12(b)中风电场的输出功率也波形较为严重。

## 3 仿真分析

文章基于 PSCAD 构建了图 8 所示的海上风电经柔直送出的仿真模型, 其中风电场容量为 200 MW。风电场经主变升压至 230 kV, 并通过 30 km 的交流电缆送至柔直换流站。柔直系统的容量为 900 MW, 并通过 200 km 的直流电缆送入电网侧。故障位置设置在送端交流线路 15 km 处, 故障开始时间为 1 s, 持续时间为 0.2 s。



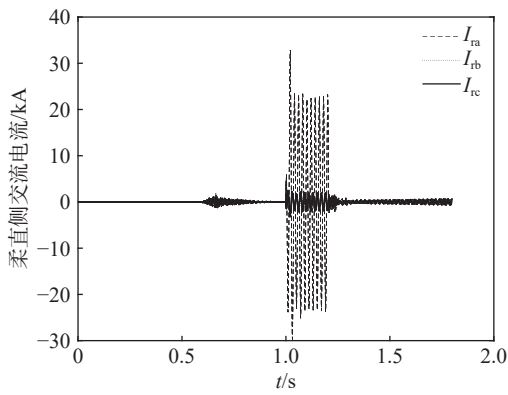
(a) 柔直侧交流电压及风场电压



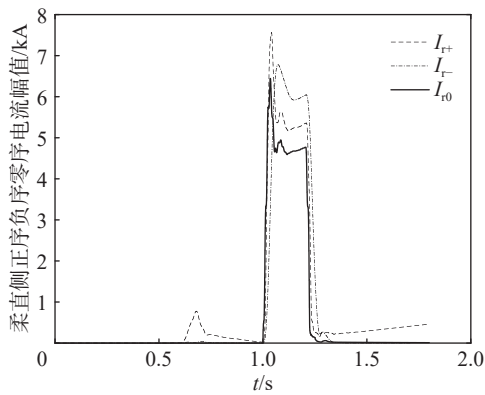
(b) 风场输出功率

图 9 单相故障下柔直侧及风场侧电压及风场输出功率

Fig. 9 Voltage and output power of wind field on the flexible side and wind field side under single-phase fault



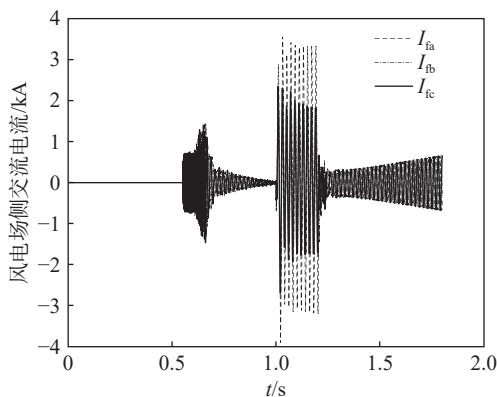
(a) 柔直侧交流电流



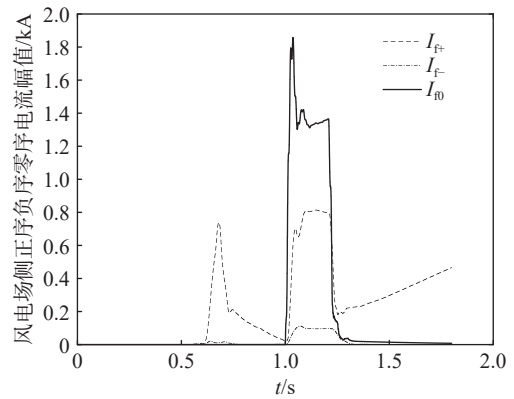
(b) 柔直侧正序负序零序电流幅值

图 10 单相故障下柔直侧三相电流及故障复合序电流  
Fig. 10 Three-phase current and fault compound sequence current on the soft and straight side under single-phase fault

对比图 13(a)与图 14(a)的波形可知, 两侧的同相短路电流的相位几乎趋于一致, 且两侧电流的最大值不超过负荷电流的 2 倍。对比图 10(b)与图 11(b)的波形可知, 柔直侧、风场侧电流分量中仅有正序电流, 符合理论推导的结果。

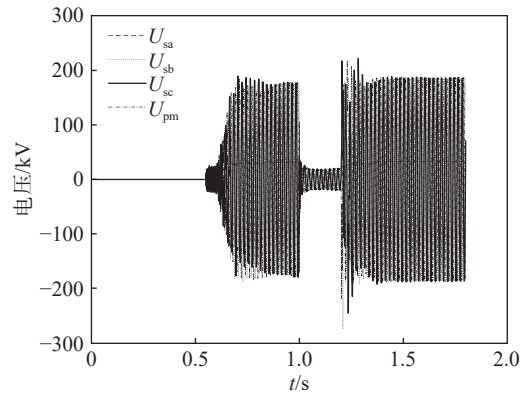


(a) 风电场侧交流电流

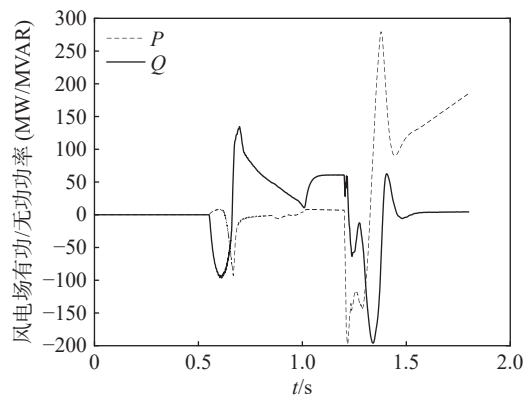


(b) 风电场侧故障电流幅值

图 11 单相故障下风场侧三相电流及故障复合序电流  
Fig. 11 Three-phase current and fault compound sequence current at downwind side of single-phase fault



(a) 柔直侧交流电压及风场电压



(b) 风电场输出功率

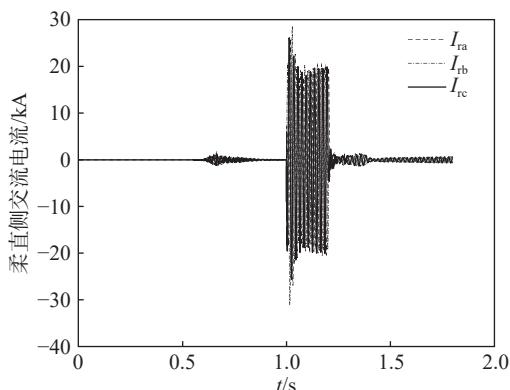
图 12 三相故障下柔直侧及风场侧电压及风电场输出功率  
Fig. 12 Voltage and output power of wind field on the flexible side and wind field under three-phase fault

#### 4 结论

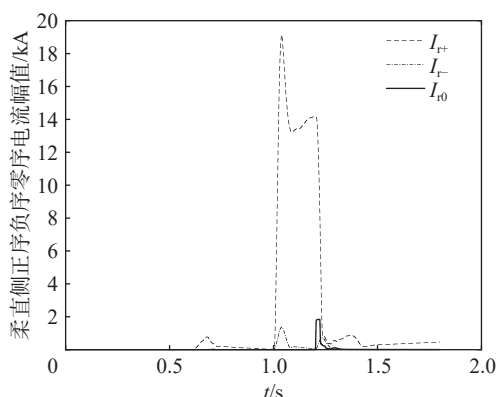
文章从不对称故障与对称故障 2 个方面开展了海上风电接入系统的故障特征机理分析, 推导不同

故障条件下短路电流解析式, 并通过仿真验证得到以下结论:

- 1) 对称分量法能够满足于在含电力电子设备接入系统下的故障分析。
- 2) 不对称故障时, 两侧的同相短路电流有一定

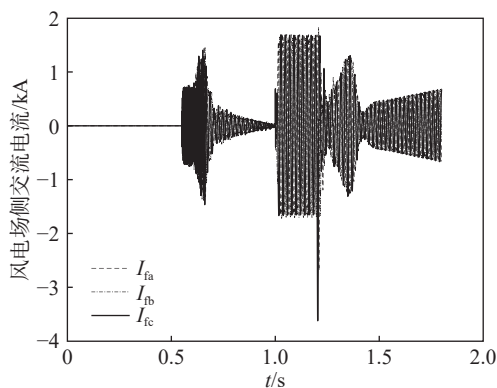


(a) 柔直侧交流电流

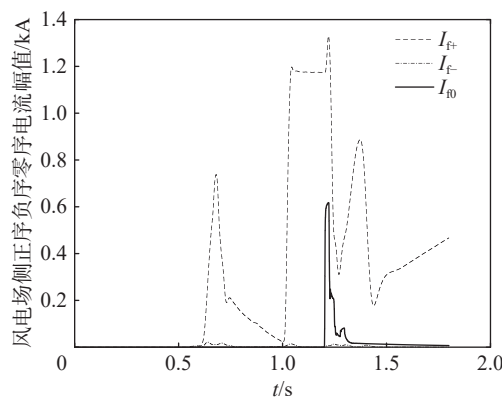


(b) 柔直侧正序负序零序电流幅值

图 13 三相故障下柔直侧三相电流及故障复合序电流  
Fig. 13 Three-phase current and fault compound sequence current on the soft and straight side under three-phase fault



(a) 风电场侧交流电流



(b) 风电场侧故障电流幅值

图 14 三相故障下风电场侧三相电流及故障复合序电流  
Fig. 14 Three-phase current and fault compound sequence current at downwind side of three-phase fault

的相角差, 柔直侧的负序电流最大, 风电场侧的短路电流整体较小。

- 3) 对称故障时, 柔直侧、风电场侧电流分量中仅有正序电流, 两侧的同相短路电流的相位几乎趋于一致, 均呈现幅值受限特征。

参考文献:

[1] 胡文森, 杨希刚, 李庚达. 我国海上风电发展探析与建议 [J]. 电力科技与环保, 2020, 36(5): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8069.2020.05.006.  
HU W S, YANG X G, LI G D. Analysis and suggestions on development of offshore wind power in China [J]. Electric power environmental protection, 2020, 36(5): 31-36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8069.2020.05.006.

[2] 蔡旭, 杨仁忻, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22. DOI: 10.7500/AEPS20210909007.  
CAI X, YANG R X, ZHOU J Q, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission [J]. Automation of electric power systems, 2021, 45(21): 2-22. DOI: 10.7500/AEPS20210909007.

[3] 邓婧, 何发武, 江志辉. 基于 ETAP 的海上风电场接入对电能质量的评估分析 [J]. 电力大数据, 2023, 26(6): 58-67. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2023.06.007.  
DENG J, HE F W, JIANG Z H. Evaluation and analysis of power quality of offshore wind farm access based on ETAP [J]. Power systems and big data, 2023, 26(6): 58-67. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2023.06.007.

[4] 聂永辉, 张瑞东, 周勤勇, 等. 海上风电场经柔直送出系统的虚拟导纳中频振荡抑制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 36-45. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231361.

- NIE Y H, ZHANG R D, ZHOU Q Y, et al. Virtual admittance control strategy for medium-frequency oscillation in an offshore windfarm when connected to a VSC-HVDC [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(9): 36-45. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231361.
- [5] 江守其, 李国庆, 辛业春, 等. 风电经架空线双极 MMC-HVDC 并网的直流故障穿越协调控制策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(11): 3516-3526. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.190724.
- JIANG S Q, LI G Q, XIN Y C, et al. Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar MMC-HVDC overhead lines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11): 3516-3526. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.190724.
- [6] 傅春翔, 叶真, 朱军峰. 基于 VSC-HVDC 的海上风电柔性直流输电系统并网控制 [J]. *机电工程技术*, 2024, 53(10): 225-227, 261. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.10.048.
- FU C X, YE Z, ZHU J F. Grid-connection control of offshore wind power flexible DC transmission system based on VSC-HVDC [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2024, 53(10): 225-227, 261. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.10.048.
- [7] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析 [J]. *电网技术*, 2015, 39(7): 1825-1832. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.07.010.
- XING D J, WU J L, WANG X W, et al. Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system [J]. *Power system technology*, 2015, 39(7): 1825-1832. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.07.010.
- [8] 李俊松, 张英敏, 曾琦, 等. MMC-MTDC 系统单极接地故障电流计算方法 [J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 546-553. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1505.
- LI J S, ZHANG Y M, ZENG Q, et al. Pole-to-ground fault current calculation method for MMC-MTDC systems [J]. *Power system technology*, 2019, 43(2): 546-553. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1505.
- [9] 卜广全, 李英彪, 王姗姗, 等. MMC 对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(21): 6303-6312. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.170037.
- BU G Q, LI Y B, WANG S S, et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(21): 6303-6312. DOI: 10.13334/j.0258-8013.psee.170037.
- [10] 易杨, 沈豫, 林章岁. 柔性直流输电系统贡献交流短路电流的特性分析及计算方法 [J]. *高电压技术*, 2018, 44(7): 2150-2158. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180628006.
- YI Y, SHEN Y, LIN Z S. Characteristics and analysis methods of ac short-circuit current contributed by VSC-HVDC [J]. *High voltage engineering*, 2018, 44(7): 2150-2158. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180628006.
- [11] 李岩, 黄豫, 潘旭东, 等. 柔直电网站内单相接地故障分析及过电压抑制 [J]. *电力工程技术*, 2021, 40(5): 71-77. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2021.05.010.
- LI Y, HUANG Y, PAN X D, et al. Single-phase-to-ground fault analysis and overvoltage suppression in the converter station of flexible DC grid [J]. *Electric power engineering technology*, 2021, 40(5): 71-77. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2021.05.010.
- [12] 李岩, 黄豫, 龚雁峰, 等. 柔性直流电网直流线路故障的过电压机理分析 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(5): 146-153. DOI: 10.7500/AEPS20190425008.
- LI Y, HUANG Y, GONG Y F, et al. Analysis on overvoltage mechanism of DC line fault in flexible DC grid [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(5): 146-153. DOI: 10.7500/AEPS20190425008.
- [13] 肖亮, 徐政, 刘昇, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 送端交流故障穿越策略 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(15): 89-98. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.15.011.
- XIAO L, XU Z, LIU S, et al. AC fault ride-through strategy of MMC-HVDC connected to passive networks [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2016, 31(15): 89-98. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.15.011.
- [14] 张钦智, 王宾, 李琰, 等. 风电场经柔性直流输电系统故障穿越协调控制研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 131-138. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190769.
- ZHANG Q Z, WANG B, LI Y, et al. Research on fault crossing coordination control of a wind farm via a flexible direct current transmission system [J]. *Power system protection and control*, 2020, 48(10): 131-138. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190769.
- [15] 蔡婷婷, 穆钢, 严干贵, 等. 提高海上风电场经 MMC 联网系统故障穿越能力的柔性泄能电阻控制策略 [J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 166-173. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0064.
- CAI T T, MU G, YAN G G, et al. A flexible control strategy of breaking resistor to enhance fault-ride-through ability for offshore wind farms integrated to grid via MMC [J]. *Power system technology*, 2020, 44(1): 166-173. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0064.
- [16] 李彬. 海上风电经柔直送出系统交流线路继电保护研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2022.
- LI B. Research on AC line relay protection of offshore wind power connected MMC-HVDC system [D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2022.
- [17] 程强, 李昱, 孙高龙, 等. 大规模海上风电场并网方式研究 [J]. *电工材料*, 2022(2): 61-64. DOI: 10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2022.02.016.
- CHENG Q, LI Y, SUN G L, et al. Research on grid connection mode of large-scale offshore wind farm [J]. *Electrical engineering materials*, 2022(2): 61-64. DOI: 10.16786/j.cnki.1671-8887.eem.2022.02.016.



- [18] 孙瑞娟. 海上风电场交直流集电系统可靠性与经济性评估 [D]. 郑州: 郑州大学, 2021. DOI: [10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.004298](https://doi.org/10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.004298).  
SUN R J. Reliability and economic evaluation of AC and DC collection systems for offshore wind power [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. DOI: [10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.004298](https://doi.org/10.27466/d.cnki.gzzdu.2021.004298).
- [19] 单蕊. 风电场参与系统快速调频的控制策略研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.001269](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.001269).  
SHAN R. Research on control strategy in wind farms participate in rapid frequency regulation [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021. DOI: [10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.001269](https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.001269).
- [20] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).  
LUO K, GUO J B, MA S C, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).
- [21] 梁宇涛, 林舜江, 冯祥勇, 等. 海上风电场交流集电和多端柔直输电并网系统多目标优化规划 [J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2404-2415. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0860](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0860).  
LIANG Y T, LIN S J, FENG X Y, et al. Multi-objective optimal planning for AC electrical collector and VSC-MTDC transmission grid-connected system of offshore wind farms [J].

*Power system technology*, 2024, 48(6): 2404-2415. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0860](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0860).

---

作者简介:



江万里

王若愚

1986-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为新型电力系统规划(e-mail)[306190020@qq.com](mailto:306190020@qq.com)。

李嘉靓

1997-, 女, 硕士, 主要研究方向为电网规划(e-mail)[765784692@qq.com](mailto:765784692@qq.com)。



梁靖仪

江万里(第一作者)

1997-, 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统规划(e-mail)[18867100706@163.com](mailto:18867100706@163.com)。

梁靖仪(通信作者)

1995-, 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统规划(e-mail)[2514017483@qq.com](mailto:2514017483@qq.com)。

(编辑 叶筠英)