

引用格式:汪华,张文,何东,等.海上风电直流送出系统单极接地故障暂态特征分析[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):146-154.

Citation: WANG Hua, ZHANG Wen, HE Dong, et al. Transient characteristic analysis of unipolar grounding faults in DC transmission system for offshore wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 146-154.

海上风电直流送出系统单极接地故障暂态特征分析

汪华¹, 张文², 何东², 程慧婕³

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510620; 2. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:针对大规模海上风电直流(direct current, DC)送出系统的故障电流分布呈现新特征的问题,分析海上风电直流送出系统线路发生单极接地故障时的故障暂态特征及其影响机理。单极接地故障响应过程可分为直流侧电容放电、网侧电流馈入和电压恢复3个暂态阶段。首先,推导海上风电直流送出系统发生单极接地故障时各个暂态阶段故障电流的数学表达式,并建立其等效电气模型;随后,根据接地电阻的阻值将故障过程划分为过阻尼、欠阻尼状态,并分析接地电阻对系统故障特征的影响;最后,在MATLAB/SIMULINK仿真软件中搭建±10 kV海上风电直流送出系统仿真模型,验证该系统发生单极接地故障时暂态特征理论分析的正确性。

关键词:海上风电;单极接地;故障电流;故障特征

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.015 中图分类号: TM614 文章编号: 1673-9140(2025)01-0146-09

Transient characteristic analysis of unipolar grounding faults in DC transmission system for offshore wind power

WANG Hua¹, ZHANG Wen², HE Dong², CHENG Huijie³

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The fault current distribution of direct current (DC) transmission systems for large-scale offshore wind power presents new characteristics. To address this issue, the transient fault characteristics of the DC transmission system line in offshore wind power when a unipolar grounding fault occurs are analyzed, as well as its influence mechanism. The response process of unipolar grounding fault can be divided into three transient phases: DC-side capacitor discharge, grid-side current feeding, and voltage recovery. The mathematical expressions of fault currents in the transient phases of unipolar grounding fault in the DC transmission system in offshore wind power are derived, and the equivalent electrical model is established. According to the resistance value of the grounding resistor, the fault process is divided into over-damped and under-damped states, and the influence of the grounding resistor on the fault characteristics of the system is analyzed. Finally, a simulation model of ±10 kV DC transmission system in offshore wind power is constructed in MATLAB/SIMULINK simulation software, which verifies the correctness of the theoretical analysis of the transient characteristics of the system in the event of a unipolar grounding fault.

Key words: offshore wind power; unipolar grounding; fault current; fault characteristic

海上风电具备环境负面影响小、不占用陆地土地资源以及适宜大规模开发等优势,是一种极

富发展潜力的新能源发电技术^[1-5]。随着海上风电的不断发展,基于电压源换流器(voltage source

收稿日期:2023-10-31;修回日期:2024-07-23

基金项目:湖南省自然科学基金(2021JJ40172)

通信作者:汪华(1987—),男,硕士,工程师,主要从事新型电力系统故障保护及控制研究;E-mail:563395121@qq.com

converter, VSC)的直流输电(VSC based HVDC, VSC-HVDC)海上风电并网技术日益得到社会的关注^[6-9]。考虑海上风电直流送出并网系统中电力电子换流器较多,复杂的故障电流特征直接影响电力电子换流器的可靠运行^[10-11],因此,需深入分析海上风电直流送出并网系统直流侧发生短路或接地故障后的故障电流特征,为海上风电故障保护提供理论支撑。

海上风电直流送出系统中直流短路故障类型主要分为单极接地和双极短路故障,其中双极短路是海上风电直流送出系统最严重故障^[12]。文献[13]以海上风电直流并网系统为研究对象,分析了双极短路故障条件下换流站故障电流的产生机理并提出一种故障电流计算方法;文献[14-15]分析了基于两电平电压源型换流器的双端直流配电系统发生双极短路故障后绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)非闭锁条件下的故障特征;文献[16]详细分析了风电系统发生双极短路故障时的故障电流特征,并提出一种故障电流峰值及峰值时间的计算方法。上述文献主要对双极短路故障特征进行了分析,为单极接地故障分析提供了借鉴。

与双极短路故障相比,单极接地为常见故障。文献[17]分析了海上风电场直流送出系统发生接地故障时的故障特性,仿真结果表明,故障发生后流经风电场换流器的故障电流会迅速增大,威胁换流器的安全运行;文献[18-19]以基于远海风电集中接入的多端直流系统为对象,建立了该系统发生极地故障时的暂态等效模型;文献[20]推导了一种多端直流系统母线发生单极接地故障时的故障电路数学计算模型,并分析了其单极接地故障特征;文献[21]考虑了直流线路间的互感耦合作用,提出了一种单极接地故障电流计算方法;文献[22]通过建立考虑交流馈入直流的故障电流等效模型,推导了稳态运行条件下交流侧电流馈入阶段的初始故障电流值;文献[23]分析了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)高压直流输电系统发生单极接地故障后交直流系统在接地故障点处的耦合作用,提出了一种故障电流等效解耦方法。上述文献暂未考虑海上风电直流送出系统发生单极接地故障时大规模海上风电系统对接地故障特征的影响,因此,有必要对大规模海上风电直流送出系统发生单极接地故障后暂态特征不清晰、故障特征理论论证不详细等问题开展进一步研究,确保海上风电直流送出系统的安全运行。

基于此,本文对海上风电直流送出系统发生单极接地故障时的直流母线电压、电流特征进行深入分析。首先,介绍海上风电直流送出系统的拓扑结构及换流站的控制策略;随后,建立海上风电直流送出系统发生单极接地故障时3个暂态阶段的等效电路模型,并推导其故障电流数学表达式,分析不同接地电阻对故障电流特征的影响;最后,在MATLAB/SIMULINK仿真平台中,搭建±10 kV海上风电直流送出系统仿真模型,验证理论分析的正确性。

1 海上风电经柔性直流送出并网系统结构

1.1 系统拓扑

目前,海上风电直流送出并网系统拓扑结构主要分为串联、并联以及串并联混合型结构^[24-25],本文所研究的并联型拓扑如图1所示,风力发电机组为永磁同步发电机(permanent magnetic synchronous generator, PMSG),柔性直流送出系统包括风力发电系统侧换流站、柔性直流输电线路电缆和交流电网侧换流站。上述换流站均采用VSC,岸上网侧变压器的连接组别为Dyn联结,中性点为小电阻接地方式^[26]。在该海上风电直流送出系统中,并联的海上风力发电系统所产生的交流电经换流站整流后通过海底电缆将直流电输送至岸上换流站,最终集中逆变并入大电网。

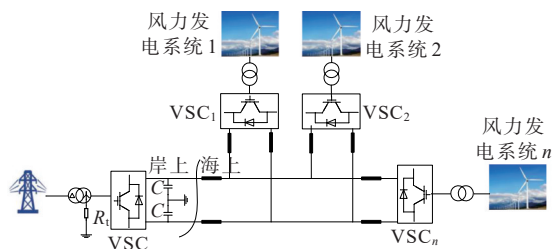


图1 海上风电直流送出并网系统

Figure 1 DC transmission grid connection system in offshore wind power

1.2 换流站控制策略

当海上风电场通过柔性直流系统输送电能时,风力发电系统侧换流站VSC₁、VSC₂、…、VSC_n均采用最大功率跟踪控制策略以保持最大功率输出,实现风力资源利用最大化。岸上换流站VSC采用定直流电压和定无功功率控制策略以维持直流母线电压平衡,其控制系统结构如图2所示,U_{dc}、U_{dc,ref}分别为柔性直流输电系统的电压实际值和参考值;Q、

Q_{ref} 分别为岸上交流电网侧的无功功率实际值和参考值; i_d 和 i_q 、 $i_{d\text{ref}}$ 和 $i_{q\text{ref}}$ 分别为岸上交流电网侧电流的 dq 轴分量实际值和参考值; u_d 和 u_q 、 $u_{d\text{ref}}$ 和 $u_{q\text{ref}}$ 分别为岸上交流电网侧电压的 dq 轴分量实际值和参考值。

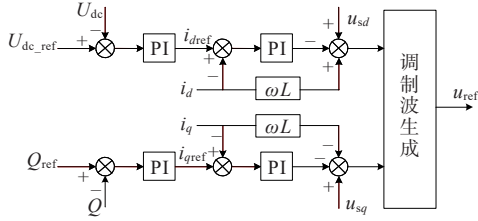


图2 岸上电网侧换流站控制策略

Figure 2 Onshore grid-side converter station control strategy

2 海上风电直流送出系统发生单极接地故障时暂态故障分析

海上风电直流送出系统发生正极接地故障时

的等效电路如图3所示, R_f 为变压器中性点接地电阻, R_f 为故障接地电阻, R_1, R_2, \dots, R_n 和 L_1, L_2, \dots, L_n 分别为输电线路的 π 模型等效电阻和电感。

根据海上风电直流送出系统发生单极接地故障后直流侧正极电容电压的变化值,将单极接地故障分为电容放电、网侧电流馈入和电压恢复3个阶段。在故障初始阶段,直流侧正极母线电压高于交流侧相电压幅值,此时故障电流主要由岸上换流站及各风力发电系统换流站直流侧的大电容放电形成,此过程称为电容放电阶段。随着正极母线电压降至交流侧任一相电压幅值以下,交流电网和风力发电机通过各自换流站中的IGBT续流二极管向故障点馈入电流,此阶段为网侧电流馈入阶段。当正极电容放电结束后其电压趋向稳定,此时负极电容开始充电并使极间电压逐渐恢复至故障前水平,此故障暂态过程为电压恢复阶段。

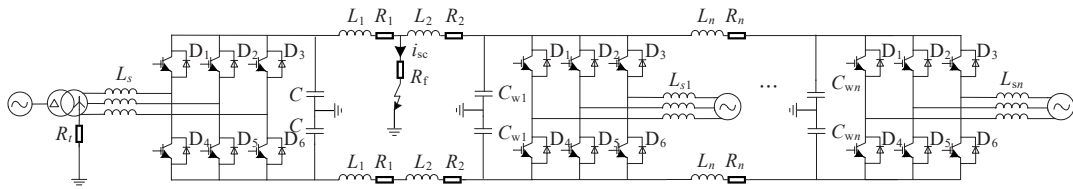


图3 单极接地故障示意

Figure 3 Unipolar grounding fault

2.1 电容放电阶段

在正极接地故障发生初期,各个换流站的正极母线电容与接地故障点通过故障线路形成放电回路,即岸上换流站母线电容 C 及各个风力发电系统中换流站母线电容 $C_{w1}, C_{w2}, \dots, C_{wn}$ 迅速放电,此阶段等效电路如图4所示。

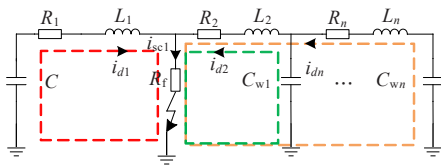


图4 电容放电阶段等效电路

Figure 4 Equivalent circuit in capacitor discharge phase

图4中 R_1, R_f, L_1 和 C 组成的放电回路中的放电电流为

$$i_{d1} = -C \frac{du_p}{dt} \quad (1)$$

$$L_1 C \frac{d^2 u_p}{dt^2} + (R_1 + R_f) C \frac{du_p}{dt} + u_p = 0 \quad (2)$$

当 $R_1 + R_f < 2\sqrt{L_1/C}$ 时,此二阶回路为欠阻尼振荡电路。假设 $u(t_0) = U_{10}, i_d(t_0) = I_{10}$,则式(2)的解为

$$i_{d1} = -C \exp(at) \cdot$$

$$[(Ab - B\alpha) \sin(bt) + (A\alpha + Bb) \cos(bt)] \quad (3)$$

其中,

$$\alpha = -\frac{R_1 + R_f}{2L_1}, b = \sqrt{\frac{1}{L_1 C} - \left(\frac{R_1 + R_f}{2L_1}\right)^2}$$

$$A = U_{10}, B = \frac{(R_1 + R_f)U_{10}C - 2L_1 I_{10}}{\sqrt{4L_1 C - (R_1 + R_f)^2 C^2}}$$

当 $R_1 + R_f > 2\sqrt{L_1/C}$ 时,此二阶回路为过阻尼振荡电路,则式(2)的解为

$$i_{d1} = -C [D_1 r_1 \exp(r_1 t) + D_2 r_2 \exp(r_2 t)] \quad (4)$$

其中,

$$r_1 = -\frac{R_1 + R_f}{2L_1} + \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_f}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C}}$$

$$r_2 = -\frac{R_1 + R_f}{2L_1} - \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_f}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C}}$$

$$D_1 = \frac{U_{10}}{2} + \frac{(R_1 + R_f)U_{10}C - 2L_1 I_{10}}{2\sqrt{(R_1 + R_f)^2 C^2 - 4L_1 C}}$$

$$D_2 = \frac{U_{10}}{2} - \frac{(R_1 + R_f)U_{10}C - 2L_1 I_{10}}{2\sqrt{(R_1 + R_f)^2 C^2 - 4L_1 C}}$$

图4中当 R_2 、 R_f 、 L_2 和 C_{w1} 组成放电回路时,其放电电流为 i_{d2} 。假设 $u_1(t_0)=U_{20}$ 、 $i_{d2}(t_0)=I_{20}$,根据式(3)、(4)可以得到欠阻尼和过阻尼状态下的 i_{d2} 表达式,分别为

$$i_{d2} = -C_{w1} \exp(\alpha_1 t) [(A_1 b_1 - B_1 \alpha_1) \sin(b_1 t) + (A_1 \alpha_1 + B_1 b_1) \cos(b_1 t)] \quad (5)$$

$$i_{d2} = -C_{w1} [D_3 r_3 \exp(r_3 t) + D_4 r_4 \exp(r_4 t)] \quad (6)$$

其中,

$$\alpha_1 = -\frac{R_2 + R_f}{2L_2}, b_1 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_{w1}} - \left(\frac{R_2 + R_f}{2L_2}\right)^2}$$

$$A_1 = U_{10}, B_1 = \frac{(R_2 + R_f)U_{10}C - 2L_2 I_{10}}{\sqrt{4L_2 C_{w1} - (R_2 + R_f)^2 C_{w1}^2}}$$

$$r_3 = -\frac{R_2 + R_f}{2L_2} + \sqrt{\left(\frac{R_2 + R_f}{2L_2}\right)^2 - \frac{1}{L_2 C_{w1}}}$$

$$r_4 = -\frac{R_2 + R_f}{2L_2} - \sqrt{\left(\frac{R_2 + R_f}{2L_2}\right)^2 - \frac{1}{L_2 C_{w1}}}$$

$$D_3 = \frac{U_{10}}{2} + \frac{(R_2 + R_f)U_{10}C_{w1} - 2L_2 I_{10}}{2\sqrt{(R_2 + R_f)^2 C_{w1}^2 - 4L_2 C_{w1}}}$$

$$r_{n+2} = -\frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)} + \sqrt{\left(\frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)}\right)^2 - \frac{1}{(L_2 + L_3 + \dots + L_n)C_{wn}}}$$

$$r_{n+3} = -\frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)} - \sqrt{\left(\frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)}\right)^2 - \frac{1}{(L_2 + L_3 + \dots + L_n)C_{wn}}}$$

$$D_{n+2} = \frac{U_{10}}{2} + \frac{(R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f)U_{10}C_{wn} - 2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)I_{10}}{2\sqrt{(R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f)^2 C_{wn}^2 - 2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)C_{wn}}}$$

$$D_{n+3} = \frac{U_{10}}{2} - \frac{(R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f)U_{10}C_{wn} - 2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)I_{10}}{2\sqrt{(R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f)^2 C_{wn}^2 - 2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)C_{wn}}}$$

由图4可知,此阶段流入接地故障点的故障电流 i_{sc1} 为 i_{d1} 、 i_{d2} 、 \dots 、 i_{dn} 之和,因此,电容放电回路在欠阻尼和过阻尼状态下的 i_{sc1} 表达式分别为

$$i_{sc1} = -C \exp(\alpha t) \cdot$$

$$[(Ab - B\alpha) \sin(bt) + (A\alpha + Bb) \cos(bt)] -$$

$$C_{w1} \exp(\alpha_1 t) [-(A_1 b_1 - B_1 \alpha_1) \sin(b_1 t) +$$

$$(A_1 \alpha_1 + B_1 b_1) \cos(b_1 t)] - \dots - C_{w(n-1)} \exp(\alpha_{n-1} t) \cdot$$

$$[(A_{n-1} b_{n-1} - B_{n-1} \alpha_{n-1}) \sin(b_{n-1} t) +$$

$$(A_{n-1} \alpha_{n-1} + B_{n-1} b_{n-1}) \cos(b_{n-1} t)] \quad (9)$$

$$i_{sc1} = -C [D_1 r_1 \exp(r_1 t) + D_2 r_2 \exp(r_2 t)] -$$

$$C_{w1} [D_3 r_3 \exp(r_3 t) + D_4 r_4 \exp(r_4 t)] - \dots$$

$$- C_{w(n-1)} [D_{n+2} r_{n+2} \exp(r_{n+2} t) +$$

$$D_{n+3} r_{n+3} \exp(r_{n+3} t)] \quad (10)$$

$$D_4 = \frac{U_{10}}{2} - \frac{(R_2 + R_f)U_{10}C_{w1} - 2L_2 I_{10}}{2\sqrt{(R_2 + R_f)^2 C_{w1}^2 - 4L_2 C_{w1}}}$$

同理,当 R_2 、 R_3 、 \dots 、 R_n 、 R_f 、 L_2 、 L_3 、 \dots 、 L_n 和 C_{wn} 组成放电回路时,其放电电流为 i_{dn} 。假设 $u_1(t_0)=U_{n0}$ 、 $i_{d2}(t_0)=I_{n0}$,根据式(3)、(4)可以得到欠阻尼和过阻尼状态下的 i_{dn} 表达式,分别为

$$i_{dn} = -C_{w(n-1)} \exp(\alpha_{n-1} t) [(A_{n-1} b_{n-1} - B_{n-1} \alpha_{n-1}) \sin(b_{n-1} t) + (A_{n-1} \alpha_{n-1} + B_{n-1} b_{n-1}) \cos(b_{n-1} t)] \quad (7)$$

$$i_{dn} = -C_{w(n-1)} [D_{n+2} r_{n+2} \exp(r_{n+2} t) + D_{n+3} r_{n+3} \exp(r_{n+3} t)] \quad (8)$$

其中,

$$\alpha_{n-1} = -\frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)}$$

$$b_{n-1} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{(L_2 + L_3 + \dots + L_n)C_{wn}} - \left(\frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{2(L_2 + L_3 + \dots + L_n)}\right)^2}$$

$$A_{n-1} = U_{10}, B_{n-1} = \frac{(R_2 + R_f)U_{10}C - 2L_2 I_{10}}{\sqrt{4L_2 C_{w1} - (R_2 + R_f)^2 C_{w1}^2}}$$

2.2 网侧电流馈入阶段

由电容放电阶段分析可知,受正极母线电容放电的影响,正极电压逐渐下降,当正极母线电压低于交流侧任一相电压幅值时,系统将进入网侧电流馈入阶段,此时,网侧 R_i 与 L_s 、换流器IGBT中续流二极管、直流线路阻抗以及正极线路 R_f 形成网侧馈入电流回路;同时,风力发电机电源与 L_{sn} 、换流器IGBT中续流二极管、直流线路阻抗、正极线路 R_f 、网侧 R_i 以及网侧换流器的下桥臂IGBT形成另一个网侧馈入电流回路,其等效电路如图5所示。在网侧电流馈入阶段,故障电流 i_{sc2} 主要由交流电网和风机发电机电源馈入接地故障点形成。

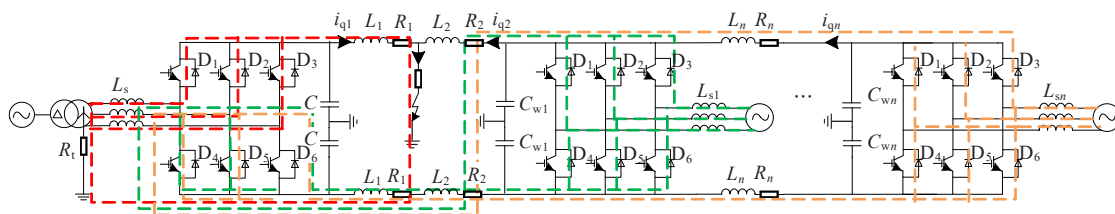


图5 网侧电流馈入阶段等效电路

Figure 5 Equivalent circuit for grid-side current feeding phase

交流电网馈入接地故障点的电流等效回路如图6所示,对回路列基尔霍夫电压方程,可得:

$$\begin{cases} (L_s + L_1) \frac{di_{a1}}{dt} + (R_1 + R_f + R_t) i_{a1} = u_{sa} \\ (L_s + L_1) \frac{di_{b1}}{dt} + (R_1 + R_f + R_t) i_{b1} = u_{sb} \\ (L_s + L_1) \frac{di_{c1}}{dt} + (R_1 + R_f + R_t) i_{c1} = u_{sc} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} i_{a1} + i_{b1} + i_{c1} = i_{q1} \\ u_{sa} + u_{sb} + u_{sc} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

求解式(11)、(12),并代入初始条件 $i_{q1}(0) = i_{d1}(t_1)$,可得:

$$\begin{cases} i_{q1} = i_{d1}(t_1) \exp(\lambda_1 t) \\ \lambda_1 = -\frac{R_1 + R_f + R_t}{L_1 + L_s} \end{cases} \quad (13)$$

由于风力发电机侧存在变压器,故障发生后将风力发电机等效为三相电压源。以a相为例,第1个风机电源馈入接地故障点电流的等效回路如图7所示。

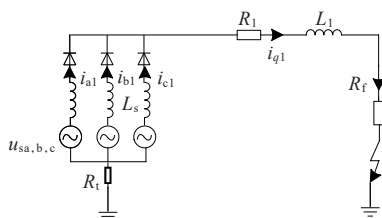


图6 交流电网馈入故障点电流等效回路

Figure 6 Equivalent current loop of AC grid fed to point of failure

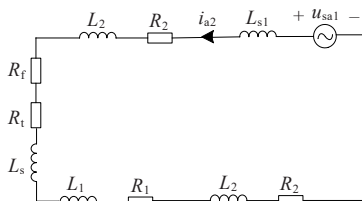


图7 风机电源馈入故障点电流等效回路

Figure 7 Equivalent current loop of wind turbine power fed to point of failure

同理,对图7所示回路的a、b、c三相分别列基尔霍夫电压方程,可得:

$$\begin{cases} (3L_{s1} + 3L_s + 3L_1 + 6L_2) \frac{di_{q2}}{dt} + \\ (3R_1 + 6R_2 + 3R_f + 3R_t) i_{q2} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

解式(14)并代入初始条件 $i_{q2}(0) = i_{d2}(t_1)$,可得:

$$\begin{cases} i_{q2} = i_{d2}(t_1) \exp(\lambda_2 t) \\ \lambda_2 = -\frac{R_1 + 2R_2 + R_f + 2R_t}{L_{s1} + L_s + L_1 + 2L_2} \end{cases} \quad (15)$$

同理,第n个风机电源向故障点馈入电流 i_{qn} 的表达式为

$$\begin{cases} i_{qn} = i_{dn}(t_1) \exp(\lambda_n t) \\ \lambda_n = -\frac{R_1 + 2R_2 + \dots + 2R_n + R_f + 2R_t}{L_{s1} + L_s + L_1 + 2L_2 + \dots + 2L_n} \end{cases} \quad (16)$$

因此,此阶段 i_{sc2} 表达式为

$$i_{sc2} = i_{d1}(t_1) \exp(\lambda_1 t) + i_{d2}(t_1) \exp(\lambda_2 t) + \dots + i_{dn}(t_1) \exp(\lambda_n t) \quad (17)$$

2.3 电压恢复阶段

在电压恢复阶段,直流侧负极母线电容 C 、 C_{w1} 、 \dots 、 C_{wn} 分别与交流电网和风力发电机通过接地故障点形成新的电流回路。由于 R_t 的存在,换流器导通时网侧电流馈入阶段中的故障电流仍然存在。当正极电容放电结束后其电压趋于稳定,此时负极电容开始充电并使极间电压逐渐恢复至故障前水平,此阶段的等效电路如图8所示。因此,分别对直流侧负极母线的 C 和 C_{w1} 充电回路列二阶非齐次常微分方程如下:

$$\frac{d^2 i_{p1}}{dt^2} + \frac{R_1 + R_t}{L_1} \frac{di_{p1}}{dt} + \frac{1}{CL_1} \cdot i_{p1} = \frac{du_s}{dt} \quad (18)$$

$$\frac{d^2 i_{p2}}{dt^2} + \frac{R_2 + R_t}{L_2} \frac{di_{p2}}{dt} + \frac{1}{C_{w1}L_2} \cdot i_{p2} = \frac{du_{s1}}{dt} \quad (19)$$

同理,对直流侧负极母线的 C_{wn} 充电回路列二阶非齐次常微分方程如下:

$$\frac{d^2 i_{pn}}{dt^2} + \frac{R_2 + R_3 + \dots + R_n + R_f}{L_2 + L_3 + \dots + L_n} \frac{di_{pn}}{dt} + \frac{1}{C_{wn} \cdot (L_2 + L_3 + \dots + L_n)} \cdot i_{pn} = \frac{du_{sn}}{dt} \quad (20)$$

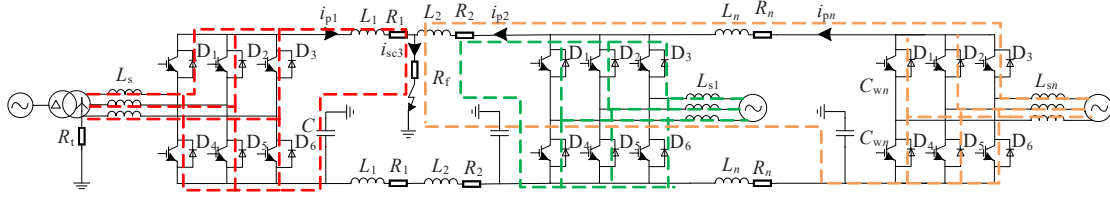


图 8 电压恢复阶段等效电路

Figure 8 Equivalent circuit in voltage recovery phase

因此,此阶段 i_{sc3} 表达式为

$$i_{sc3} = i_{p1} + i_{p2} + \dots + i_{pn} \quad (21)$$

由于式(18)~(20)中二阶非齐次常微分方程的解包含通解和特解,其通解的推导过程与文 2.1 中电容放电阶段故障电流计算过程类似,故在此处省略推导过程。

3 海上风电直流送出系统单极接地故障仿真结果分析

为了验证上述理论分析的正确性,在 MATLAB/SIMULINK 仿真平台中搭建海上风电直流送出系统仿真模型,系统主要参数如表 1 所示。

表 1 海上风电直流送出系统仿真模型主要参数

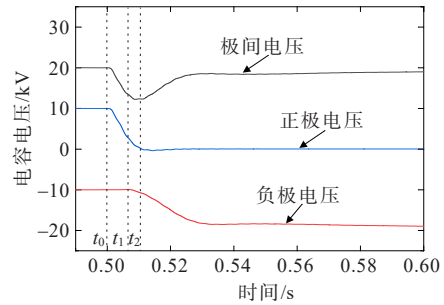
Table 1 Main parameters of DC transmission system simulation model in offshore wind power

主要参数(单位)	数值
岸上电网电压(kV)	10
岸上换流站直流母线电压(kV)	±10
风电场换流站直流母线电压(kV)	±10
风电场额定功率(MW)	0.1
并网风电组数	3
正极接地故障电阻(Ω)	0.01/0.05/0.10/1/5/15
中性点接地电阻(Ω)	5
岸上换流站直流母线电容(μF)	250
风电场换流站直流母线电容(μF)	100
直流海底电缆长度(km)	30

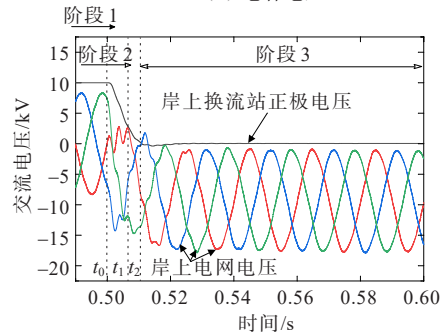
3.1 欠阻尼状态下故障仿真结果

设 $R_f=0.1 \Omega$ 、 $t_0=0.5 \text{ s}$ 时刻发生正极接地故障,此时故障回路属于欠阻尼状态。正极接地故障暂态过程的直流侧母线电容电压、交流侧电压、故障电流响应波形如图 9 所示, $t_0 \sim t_1$ 为电容放电阶段,在 C 和 C_w 共同放电作用下,正极电压从 10 kV 迅速下降,极间电压也随之下降; $t_1 \sim t_2$ 为网侧电流馈入阶段, $t_1=0.509 \text{ s}$ 时正极电压低于交流电网侧某一相电压幅值,系统进入网侧电流馈入阶段。随着正极电容放电过程结束, $t_2=0.511 \text{ s}$ 后为电压恢复阶段,此阶段负极电容开始充电,负极电容电压由

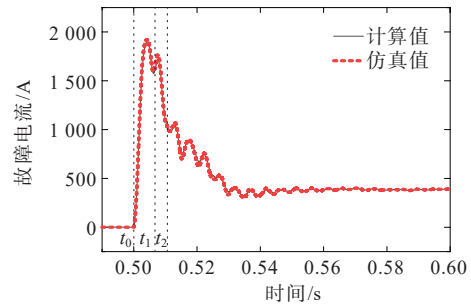
-10 kV 反向上升至 -20 kV,此时极间电压逐渐恢复至故障前水平 20 kV。由理论分析可知,系统欠阻尼条件下正极电容放电过程具有振荡特性,因此图 9(c)中 i_{sc} 亦呈此现象。同时利用 MATLAB 软件计算得到欠阻尼条件下 i_{sc} 理论计算值(图 9(c)中黑色实线); $t=0.502 \text{ s}$ 时 i_{sc} 仿真峰值为 1 891.41 A,与理论计算峰值 1 889.35 A 相比其相对误差为 0.109%。 i_{sc} 的仿真与理论计算曲线相似度较高,验证了理论分析的正确性。受 R_f 的影响系统进入稳态后故障电流不为零。



(a) 电容电压



(b) 交流电压



(c) 故障电流

图 9 欠阻尼状态下故障仿真结果

Figure 9 Fault simulation results under under-damped state

3.2 过阻尼状态下故障仿真结果

设 $R_f=5\ \Omega$ 、 $t_0=0.5\ \text{s}$ 时刻发生正极接地故障,故障回路属于过阻尼状态。正极接地故障暂态过程的直流母线电容电压、交流侧电压及故障电流响应波形如图 10 所示。

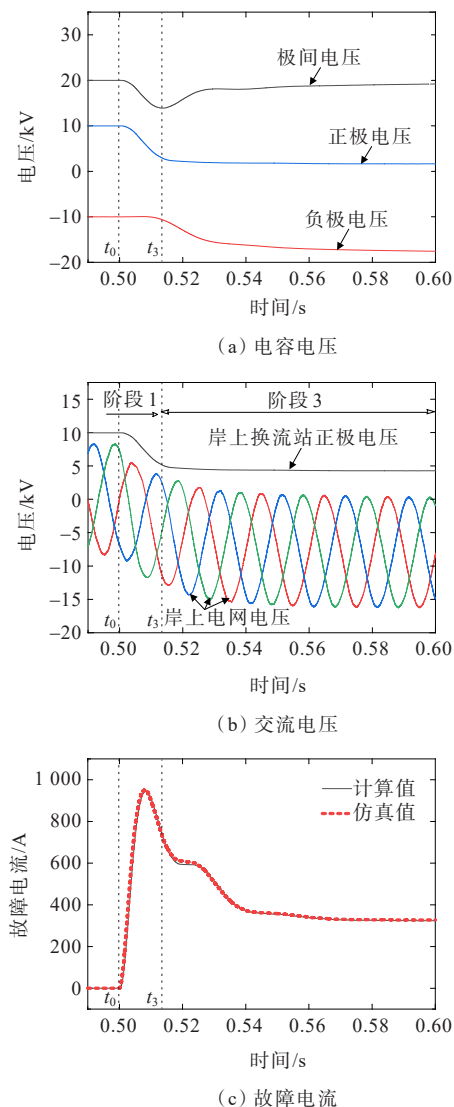


图 10 过阻尼状态下故障仿真结果

Figure 10 Fault simulation results under over-damped state

图 10 中 $t_0\sim t_3$ 为电容放电阶段,在 C 和 C_w 共同放电作用下,正极电压从 $10\ \text{kV}$ 缓慢下降且最终大于零。由于正极电压未下降至网侧任一相电压幅值以下的情况,此时系统未进入网侧电流馈入阶段。随着正极电容放电结束, $t_3=0.513\ 0\ \text{s}$ 后为电压恢复阶段,此阶段负极电容开始充电,负极电容电压由 $-10\ \text{kV}$ 反向逐渐上升,但最终未达到 $-20\ \text{kV}$ 。由理论分析可知,系统过阻尼条件下正极电容放电过程呈现非振荡特性,因此 i_{sc} 亦呈此现象。同时,利用 MATLAB 软件计算得到过阻尼条件下 i_{sc} 理论计

算值(图 10(c)中黑色实线); $t=0.505\ 0\ \text{s}$ 时故障电流仿真峰值为 $931.81\ \text{A}$,与理论计算峰值 $930.58\ \text{A}$ 相比其相对误差为 0.131% 。 i_{sc} 的仿真与理论计算结果曲线相似度较高,验证了理论分析的正确性。同理受 R_f 的影响系统进入稳态后故障电流不为零。

3.3 接地故障电阻对故障特征的影响仿真结果

为了分析相同故障条件下接地故障电阻不同时对故障特征的影响,在系统欠阻尼条件下,接地故障电阻分别设置为 0.01 、 0.05 和 $0.10\ \Omega$,过阻尼条件下接地故障电阻分别设置为 1 、 5 和 $15\ \Omega$ 时,岸上换流站 VSC 中的正极电压和故障电流仿真结果如图 11 所示。

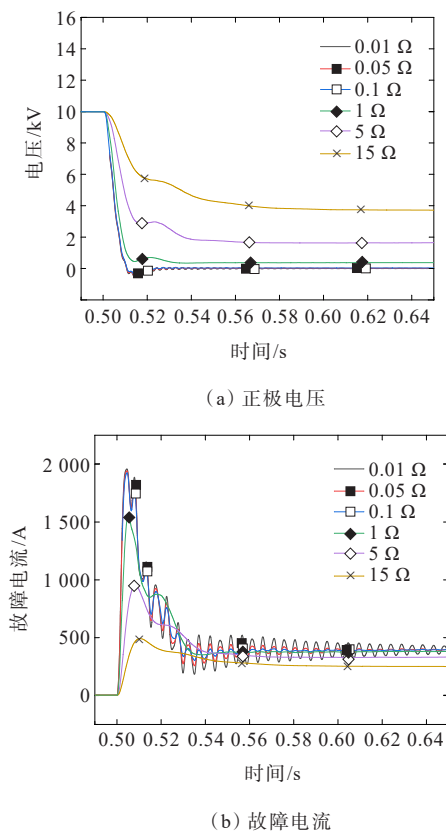


图 11 接地故障电阻对故障特征的影响仿真结果

Figure 11 Simulation results of effect of grounding fault resistance on fault characteristics

由图 11(a)可知,与过阻尼条件相比,欠阻尼条件下正极电压 u_p 达到稳定时会发生振荡现象,且稳定状态下 u_p 会下降至零附近。随着接地电阻的增大,正极电压 u_p 的下降速度会减慢,正极电压 u_p 最终的稳定值变大。由图 11(b)可知,与过阻尼条件相比,欠阻尼条件下 i_{sc} 呈现振荡衰减现象,且 i_{sc} 的峰值最大可达 $1.9\ \text{kA}$ 。因此,随着接地电阻的增大, i_{sc} 的上升速度变缓,达到峰值的时间增大, i_{sc} 的峰值也随

之降低。因此,在设计海上风电直流送出系统故障保护方案时需充分考虑接地故障电阻对其故障特征的影响。

4 结语

当海上风电直流送出系统发生单极接地故障时,故障电流呈现上升速度快、峰值高等新特征。本文推导了海上风电直流送出系统发生单极接地故障时电容放电、网侧电流馈入和电压恢复3个阶段的故障电流表达式,并建立其等效电路模型。同时分析了不同接地故障电阻对系统故障特征的影响,并将其划分为过阻尼和欠阻尼状态。最后在MATLAB/SIMULINK仿真平台中搭建±10 kV海上风电直流送出系统仿真模型,验证了理论分析的正确性。

1) 当接地电阻较小时其故障暂态过程属于欠阻尼状态,故障过程将经历直流侧电容放电、网侧电流馈入和电压恢复3个阶段;当接地电阻较大时其故障暂态过程属于过阻尼状态,直流侧母线电容放电缓慢,暂态过程将避开网侧电流馈入阶段。

2) 接地电阻会影响直流母线电压的恢复时间、故障电流上升速度及其峰值。接地电阻越大,故障电流上升速度越慢其峰值越小,且故障极电压下降缓慢其稳定值增大,同时直流母线电压恢复时间也增加。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,李昊,乔颖.从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J].全球能源互联网,2021,4(1):12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021,4(1):12-18.
- [2] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [3] 刘凯,姚骏,汪军,等.基于零序环流控制器的海上风电MMC-HVDC并网系统小干扰稳定分析与优化控制[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4068-4081.
LIU Kai, YAO Jun, WANG Jun, et al. Small signal stability analysis and optimization control of offshore wind power generation MMC-HVDC grid-connected system based on zero-sequence circulating current controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4068-4081.
- [4] 赵峥,李明,田园园,等.江苏如东海上风电柔直工程系统谐振分析与抑制[J].电力建设,2023,44(6):144-152.
ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 144-152.
- [5] 孙银锋,刘金鑫,梁栋.基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J].智慧电力,2023,51(10):85-92.
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 85-92.
- [6] 刘蔡旭,杨仁焯,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.
LIU Caixu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [7] 徐政.海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J].电力系统自动化,2022,46(21):1-10.
XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10.
- [8] 杨仁焯,施刚,蔡旭,等.风电多端柔直送出系统电压源型控制[J].中国电机工程学报,2020,40(5):1498-1509.
YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Voltage source control of VSC-MTDC systems with wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1498-1509.
- [9] 梅永振,王海云,柳爽,等.面向新能源发电的直流电网组网外送拓扑结构及运行特性研究[J].电力科学与技术学报,2017,32(2):39-46.
MEI Yongzhen, WANG Haiyun, LIU Shuang, et al. Research on the topological structure and operating characteristics of DC power grid network delivery for new energy generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 39-46.
- [10] XU K, ZHANG Z, LAI Q, et al. Study on fault characteristics and distance protection applicability of VSC-HVDC connected offshore wind power plants[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107252.
- [11] 俞露杰,付子玉,朱介北,等.远海风电DRU-HVDC送出系统构网控制与启动方法综述[J].电力系统自动化,2023,47(24):63-79.
YU Lujie, FU Ziyu, ZHU Jiebei, et al. Review on grid-

- forming control and start-up method of diode-rectifier-unit based HVDC transmission system for remote offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(24):63-79.
- [12] LI R, YU L, XU L, et al. Operation of offshore wind farms connected with DRU-HVDC transmission systems with special consideration of faults[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5):608-617.
- [13] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于 MMC 的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(12): 63-74.
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(12): 63-74.
- [14] 刘琪, 王守相, 嵇程程, 等. 直流配电系统极间短路故障特性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 32(12):16-25.
LIU Qi, WANG Shouxiang, ZHUO Chengcheng, et al. Pole-to-pole short-circuit fault characteristic analysis for DC distribution Systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 32(12):16-25.
- [15] 李继攀, 刘宏领, 郭奇军, 等. 基于功率因数角的接地变压器匝间短路故障辨识[J]. 供用电, 2023, 40(9): 50-57.
LI Jipan, LIU Hongling, GUO Qijun, et al. Identification of inter turn short circuit fault of grounding transformer based on power factor angle[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 50-57.
- [16] SHUAI Z, HE D, XIONG Z, et al. Comparative study of short-circuit fault characteristics for VSC-based DC distribution networks with different distributed generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1):528-540.
- [17] GUO G, ZHA K, ZHANG J, et al. Grounding fault in series-connection-based offshore wind farms: fault clearance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9):9357-9367.
- [18] 李佳朋, 李宇骏, 袁泉添, 等. 远海风能集中接入的多端直流系统直流故障分析与故障检测方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12):119-128.
LI Jiapeng, LI Yujun, YUAN Xiaotian, et al. DC fault analysis and detection for offshore wind farms integration via MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):119-128.
- [19] 杨捷, 孙哲, 苏辛一, 等. 考虑振荡型功率的直流微电网储能系统无互联通信网络的多目标功率分配方法[J]. 发电技术, 2024, 45(2):341-352.
YANG Jie, SUN Zhe, SU Xinyi, et al. A wireless multi-objective power sharing method for energy storage system in DC micro-grid considering oscillatory-type power[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 341-352.
- [20] 鄢仁武, 俞智鹏, 方略斌. 适用于 MMC-MTDC 的母线侧故障分析及保护策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(5):2067-2077.
YAN Renwu, YU Zhipeng, FANG Luebin. Bus-side fault analysis and protection strategy for MMC-MTDC[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5):2067-2077.
- [21] LI B, WANG W, LI B, et al. Research on a current calculation method and characteristics of pole-to-ground faults in true bipolar MMC-HVDC grids considering line coupling[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 192:106985.
- [22] 孙银锋, 熊欣, 王振浩, 等. 考虑交流馈入和稳态运行条件的柔性直流电网故障电流分析方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8):1-11.
SUN Yinfeng, XIONG Xin, WANG Zhenhao, et al. Calculation method for pole-to-ground fault current of DC lines in MMC-HVDC system considering discharging coupling[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8):1-11.
- [23] 李伟杰, 郝亮亮, 叶雪辉, 等. 考虑放电耦合的 MMC-HVDC 系统直流线路单极接地故障电流的计算方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(9):68-75.
LI Weijie, HAO Liangliang, YE Xuehui, et al. Calculation method of unipolar ground fault current of DC line in MMC-HVDC system considering discharge coupling[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(9):68-75.
- [24] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8):2036-2048.
CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8):2036-2048.
- [25] 张磊, 王满康, 随权, 等. 考虑场间-场内风电机组疲劳载荷均衡的海上风氢系统灵活调度[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21):151-160.
ZHANG Lei, WANG Mankang, SUI Quan, et al. Flexible scheduling of offshore wind-hydrogen system considering inter-field-in-field wind turbine fatigue load balancing[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 151-160.
- [26] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网故障分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8):1863-1874.
DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Fault analysis of flexible DC distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8):1863-1874.