

含分布式光伏的中压直流配电网接地故障暂态特性分析

何东¹,徐明章¹,兰征¹,王伟²,曾进辉¹,余雪萍¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院,湖南 株洲 412007;2. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:针对分布式光伏接入直流配电网后故障电流分布呈现新特征的问题,以含分布式光伏的中压直流配电网为研究对象,分析直流母线发生单极接地故障时的故障暂态特征和影响机理。单极接地故障响应过程可以分为直流侧电容放电、光伏电源多回路供电、光伏电源续流以及电感续流4个阶段,并根据4个阶段的暂态特性推导得到了各故障阶段中各个变换器直流侧电容电压以及故障电流的时域表达式。通过分析故障电流的典型特征可以发现单极接地的故障电阻大小对故障电流的幅值和到达峰值的时间影响较大。最后在PSCAD/EMTDC仿真软件中搭建含分布式光伏的±10 kV双端供电型直流配电网仿真模型,验证了含分布式光伏的中压直流配电网单极接地故障暂态特性理论分析的正确性。

关键词:分布式光伏;直流配电网;接地故障;故障电流;故障特征

中图分类号:TM71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202303006

0 引言

随着新能源技术的快速发展,以及直流用电负荷的增多,直流配电网再次成为各国学者们的研究热点。直流配电网相比传统交流配电网电能质量优^[1],功率密度高^[2-3],易于多类型分布式电源的接入^[4]。此外,随着国家能源战略转型,建设以新能源为主体的新型电力系统已成为电网发展的新方向^[5]。分布式光伏发电系统作为典型新能源代表之一,凭借其发电成本低、易于直接接入直流配电网等优点得到了广泛应用和迅速发展^[6]。然而,随着分布式光伏接入直流配电网,不同的容量、不同的接入位置等因素会对直流配电网的运行特征带来较大的影响^[7-8]。且当含分布式光伏的直流配电网发生直流短路故障后,故障电流将呈现更加复杂的新特征^[9],这可能导致原直流保护系统中部分故障检测方法失效,甚至对直流配电网的安全稳定运行产生较大影响。因此,深入研究含分布式光伏的中压直流配电网在发生直流故障后的故障特征新问题,对实现直流配电网的快速故障保护具有重要的实际意义。

目前,针对含分布式电源的直流配电网故障暂态分析研究尚处于起步阶段^[10-11]。考虑到直流配电网中电力电子变换器较多,为确保变换器及系统的可靠运行,必须对直流侧发生短路或接地故障后的故障特性进行分析。文献[12]以环形风电直流系统作为研究对象,分析了该系统发生双极短路故障后

电压型变换器的故障特性,但未考虑风电机组对系统故障特性的影响。文献[13]从直流系统保护配置的角度出发,分析了直流侧发生不同接地故障时交流侧的故障电流特征及系统响应特性,并考虑了接地电阻参数对直流配电网故障特性的影响。文献[14]分析了基于两电平电压源换流器(voltage source converter, VSC)的直流配电网发生极间短路故障时的故障电流特征,并推导了各暂态阶段的故障电流解析表达式。文献[15]研究了直流系统发生极间短路和单极接地故障后,当VSC中绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)未闭锁时的故障特征,并分析了过渡电阻对这2类故障特性的影响。文献[16]分析了含光伏发电系统的直流配电网在光伏电源侧发生极间短路故障时变换器的暂态故障过程,并考虑了光伏电源的输出特性,得到了各故障阶段的数学模型。文献[9]研究了含光伏发电系统、风力发电系统和超级电容储能系统的3种分布式电源分别接入直流配电网后发生直流短路故障时的故障特征,并分析对比了这3类分布式电源对故障电流幅值和峰值到达时间的影响。因此,有必要对含分布式光伏的直流配电网发生接地故障后故障暂态特征不清晰、故障特征理论论证不详细等问题做进一步研究,为直流保护提供理论指导。

本文在前期研究工作^[9]的基础上,主要开展含分布式光伏的中压直流配电网直流母线接地故障暂态特性研究。首先,建立含分布式光伏的±10 kV双端供电型中压直流配电网模型,利用电路等效原理分析直流母线发生接地故障时4个故障阶段的响应特征,并推导各故障阶段的直流母线电压、故障电流解析表达式;然后,分析接地故障电阻对故障电流幅值、到达峰值时间的影响;最后,在PSCAD/EMTDC

收稿日期:2022-10-12;修回日期:2023-02-21

在线出版日期:2023-03-06

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40172)

Project supported by Hunan Provincial Natural Science Foundation(2021JJ40172)

仿真平台搭建含分布式光伏的 ± 10 kV双端供电型中压直流配电系统仿真模型,验证了该系统发生单极接地时故障特性分析的正确性。

1 含分布式光伏的中压直流配电网接地故障暂态特性分析

1.1 含分布式光伏的中压直流配电网

目前,国内外对直流配电网拓扑结构的研究主要以单端辐射形和双端供电型结构为主。由于直流配电网的直流母线发生短路或接地故障时,单端辐射形拓扑结构的直流配电网抗波动及故障能力较差,严重影响配电网的安全可靠运行。双端供电型结构的直流配电网因有双端供电交流电源,且双端交流电源借助VSC与中压直流母线连接,具备双向功率流动能力,有利于分布式光伏电源的接入并网。基于此,本文所研究的含分布式光伏的直流配电网采用双端供电型拓扑结构,如图1所示。图中: C 为VSC的直流母线电容; L_i 、 L_k 为电网侧滤波电感; R_{a1} — R_{an} 、 R_d 、 R_e 、 R_g 、 R_h 和 L_{a1} — L_{an} 、 L_d 、 L_e 、 L_g 、 L_h 分别为系统中各连接点之间的线路等效电阻和电感,其中 R_{a1} 和 L_{a1} 分别为VSC₁和VSC₂到接地故障点的正负电缆等效电阻、电感。交流电网通过变压器与VSC连接,并可利用VSC与 ± 10 kV直流母线实现功率双向流动。VSC采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制技术来控制变换器中的全控型电力电子器件IGBT,可使VSC工作在整流和逆变模式。光伏发电系统由Boost变换器接入直流母线,Boost变换器采用最大功率点跟踪控制方法来实现光伏发电系统的高功率输出。直流负载通过一个隔离型降压DC/DC变换器连接到直流母线,交流负载则通过一个隔离型DC/AC逆变器连接到直流母线。

1.2 中压直流母线发生接地故障时故障暂态特性分析

分布式光伏发电系统接入中压直流配电系统后,当 ± 10 kV直流母线某处发生单极接地故障时的等效电路如附录A图A1所示。图中:双端供电型中压直流配电网通过VSC与交流系统相连,假设该系统可有 n 个光伏发电系统通过Boost变换器连接至直流母线; R_1 — R_n 和 L_1 — L_n 分别为光伏发电系统1— n 的Boost变换器到接地故障点的正负电缆的等效电阻和电感; R_f 为接地故障电阻。为了方便分析接地故障发生后的暂态特性,假设该直流配电网接地故障发生时,VSC和各Boost变换器中的IGBT因自我保护功能而快速闭锁^[9],此刻各变换器的控制策略对故障特性不再产生影响。此时,含分布式光伏的中压直流配电系统接地故障响应过程主要分为以下4个阶段。

1) 第一阶段:电容放电阶段。

电容放电阶段的时间间隔为 t_0 — t_1 ,从VSC₁和VSC₂侧直流母线电容开始放电到中压直流母线电压下降至0结束。接地故障发生之初,直流母线电压大于交流系统的线电压,且各个光伏发电系统中Boost变换器处于升压模式,二极管 D_p 关断。直流侧接地故障电流主要由2个VSC的直流母线电容 C_{a1} 、 C_{a3} 和光伏发电系统中Boost变换器母线电容 C_{b1} — C_{bn} 的快速放电为主。此时,电容 C_{pv} 工作在充电状态。此阶段等效电路如图2(a)所示。为了简化分析接地故障电流的暂态过程,在分析时忽略了交集路径上动态元件的交互影响。在此前提下,对各电容放电所组成的闭合回路进行如下分析。

R_{a1} 、 R_f 、 L_{a1} 和 C_{a1} 组成放电回路,放电电流 i_1 如图2(a)所示。由 C_{a1} 的电压、电流关系及基尔霍夫电压

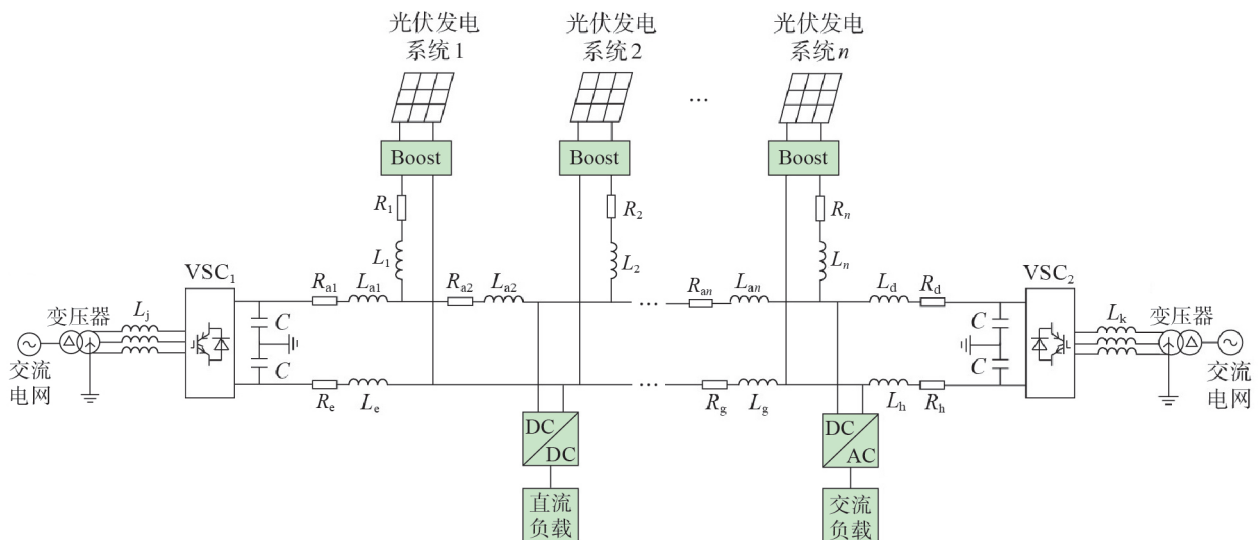


图1 含分布式光伏的双端供电型中压直流配电网结构图

Fig.1 Structure diagram of double-terminal power supply type medium-voltage DC distribution network with distributed photovoltaics

定律可得:

$$i_1 = -C_{a1} \frac{du_1}{dt} \quad (1)$$

$$L_{a1} C_{a1} \frac{d^2 u_1}{dt^2} + (R_{a1} + R_f) C_{a1} \frac{du_1}{dt} + u_1 = 0 \quad (2)$$

式中: u_1 为 C_{a1} 两端电压。

式(2)所对应的特征方程为:

$$L_{a1} C_{a1} \lambda^2 + (R_{a1} + R_f) C_{a1} \lambda + 1 = 0 \quad (3)$$

其特征根为:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_1 &= -\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1}} \pm \sqrt{\left(\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1} C_{a1}}\right)^2 - \frac{1}{L_{a1} C_{a1}}} \\ \lambda_2 &= -\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1}} \mp \sqrt{\left(\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1} C_{a1}}\right)^2 - \frac{1}{L_{a1} C_{a1}}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

由式(4)可知,若故障点位置离变换器出口较近或接地故障电阻较小,即 $R_{a1} + R_f < 2\sqrt{L_{a1}/C_{a1}}$,则电容的放电过程是一个二阶欠阻尼振荡过程, λ_1 和 λ_2 是一对共轭复数。若故障点距离变换器出口较远或接地故障电阻较大,即 $R_{a1} + R_f > 2\sqrt{L_{a1}/C_{a1}}$,则电容的放电过程是一个非周期性衰减过程,式(4)中的 λ_1 和 λ_2 是一对不相等的负实数。本文主要考虑中压直流配电网发生单极小电阻接地故障来分析小电阻接地

故障情况下的故障暂态特性,以此来完善中压直流配电网的接地故障分析理论体系,并为直流配电网保护技术的发展提供支撑。因此,本文分析电容放电过程时主要考虑欠阻尼振荡情况。

在 R_{a1} 、 R_f 相对较小情况下,即电容放电过程为欠阻尼振荡时,可满足:

$$R_{a1} + R_f < 2\sqrt{\frac{L_{a1}}{C_{a1}}} \quad (5)$$

即 λ_1 和 λ_2 为一对共轭复数,可得式(2)的解为:

$$u_1 = e^{\alpha_1 t} [A_1 \cos(b_1 t) + B_1 \sin(b_1 t)] \quad (6)$$

$$i_1 = C_{a1} e^{\alpha_1 t} [(A_1 b_1 - B_1 \alpha_1) \sin(b_1 t) - (A_1 \alpha_1 + B_1 b_1) \cos(b_1 t)] \quad (7)$$

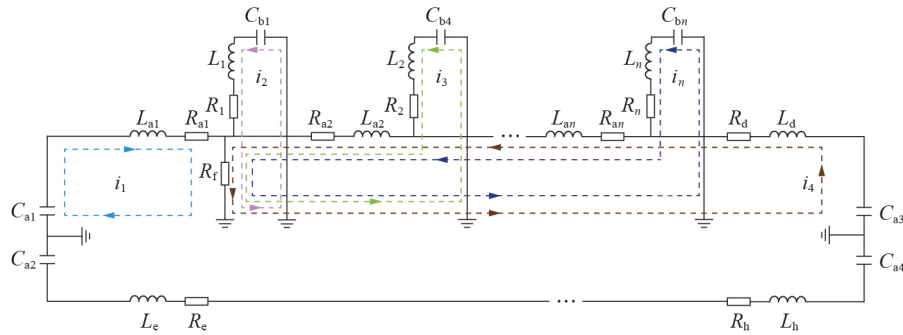
式中: α_1 、 b_1 、 A_1 、 B_1 的表达式见附录A式(A1)。

当 R_1 、 R_f 、 L_1 和 C_{b1} 组成放电回路时,放电电流 i_2 如图2(a)所示。同理,根据式(7)可得到 i_2 表达式为:

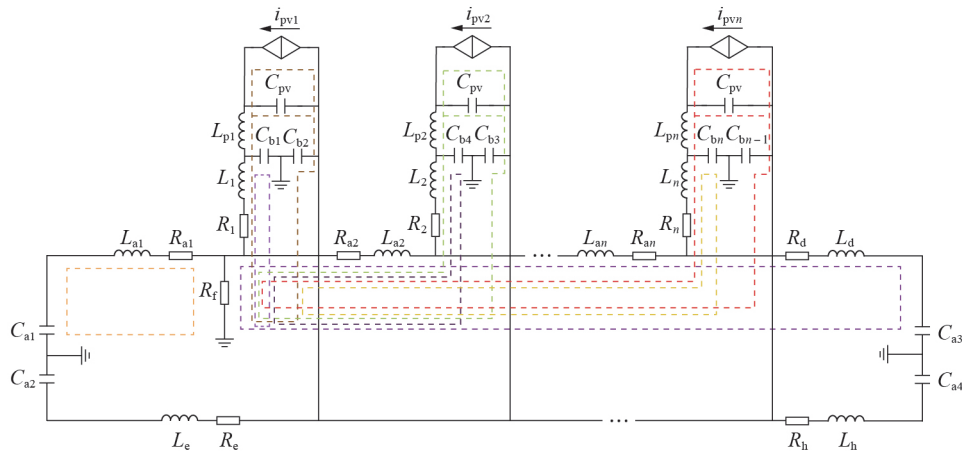
$$i_2 = C_{b1} e^{\alpha_2 t} [(A_2 b_2 - B_2 \alpha_2) \sin(b_2 t) - (A_2 \alpha_2 + B_2 b_2) \cos(b_2 t)] \quad (8)$$

式中: α_2 、 b_2 、 A_2 、 B_2 的表达式见附录A式(A2)。

当 R_2 、 R_{a2} 、 R_f 、 L_2 、 L_{a2} 和 C_{b4} 组成放电回路时,放电电流 i_3 如图2(a)所示。根据式(7)可得到 i_3 表达式为:



(a) 电容放电阶段



(b) 光伏电源多回路供电阶段

图2 含分布式光伏的中压直流配电网在不同故障阶段的等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagrams of medium-voltage DC distribution network with distributed photovoltaics at different fault stages

$$i_3 = C_{b4} e^{\alpha_3 t} [(A_3 b_3 - B_3 \alpha_3) \sin(b_3 t) - (A_3 \alpha_3 + B_3 b_3) \cos(b_3 t)] \quad (9)$$

式中: α_3, b_3, A_3, B_3 的表达式见附录A式(A3)。

当 $R_{a2} - R_{an}, R_d, R_f, L_{a2} - L_{an}, L_d$ 和 C_{a3} 组成放电回路时, 放电电流 i_4 如图2(a)所示。根据式(7)可得到 i_4 表达式为:

$$i_4 = C_{a3} e^{\alpha_4 t} [(A_4 b_4 - B_4 \alpha_4) \sin(b_4 t) - (A_4 \alpha_4 + B_4 b_4) \cos(b_4 t)] \quad (10)$$

式中: α_4, b_4, A_4, B_4 的表达式见附录A式(A4)。

当光伏发电系统 n 接入直流配电网后, $R_{a2} - R_{an}, R_n, R_f, L_{a2} - L_{an}, L_n$ 和 C_{bn} 组成放电回路, 放电电流 i_n 如图2(a)所示。根据式(7)可得到 i_n 表达式为:

$$i_n = C_{bn} e^{\alpha_n t} [(A_n b_n - B_n \alpha_n) \sin(b_n t) - (A_n \alpha_n + B_n b_n) \cos(b_n t)] \quad (11)$$

式中: α_n, b_n, A_n, B_n 的表达式见附录A式(A5)。

综上分析, 此阶段接地故障电流 i_f 为电流 $i_1 - i_n$ 之和, 因此第一阶段故障电流 i_f 的表达式及具体展开式分别如式(12)、(13)所示。

$$i_f = i_1 + i_2 + \dots + i_n \quad (12)$$

$$i_f = C_{a1} e^{\alpha_1 t} [(A_1 b_1 - B_1 \alpha_1) \sin(b_1 t) - (A_1 \alpha_1 + B_1 b_1) \cos(b_1 t)] + C_{b1} e^{\alpha_2 t} [(A_2 b_2 - B_2 \alpha_2) \sin(b_2 t) - (A_2 \alpha_2 + B_2 b_2) \cos(b_2 t)] + C_{b4} e^{\alpha_3 t} [(A_3 b_3 - B_3 \alpha_3) \sin(b_3 t) - (A_3 \alpha_3 + B_3 b_3) \cos(b_3 t)] + C_{a3} e^{\alpha_4 t} [(A_4 b_4 - B_4 \alpha_4) \sin(b_4 t) - (A_4 \alpha_4 + B_4 b_4) \cos(b_4 t)] + \dots + C_{bn} e^{\alpha_n t} [(A_n b_n - B_n \alpha_n) \sin(b_n t) - (A_n \alpha_n + B_n b_n) \cos(b_n t)] \quad (13)$$

2) 第二阶段: 光伏电源多回路供电阶段。

光伏电源多回路供电阶段的时间间隔为 $t_1 - t_2$, 从各光伏发电系统 Boost 变换器的二极管 D_p 导通开始。在第一阶段, 由于 $C_{b1}, C_{b4} - C_{bn}$ 快速放电, 其电容电压逐渐减小, 当降至低于光伏电源侧电压时, 二极管 D_p 导通, 光伏电源 i_{pv}, C_{pv} 开始向故障点供电。同时 $C_{b1}, C_{b4} - C_{bn}$ 以及 VSC₁ 和 VSC₂ 直流侧电容 C_{a1} 和 C_{a3} 继续向故障点放电, 由于电容 C_{pv} 的容值小于 $C_{b1} - C_{bn}$, 根据电容放电时间常数等于电阻与电容的乘积可知, 相同故障条件下的电容 $C_{b1} - C_{bn}$ 放电时间要比电容 C_{pv} 长。此时, 线路等效电感 L_{a1} 和 L_d 将存储部分能量。此阶段等效电路图见图2(b)。

此阶段, 由 C_{b1}, L_1 及 R_1, R_f 形成放电回路; 光伏电源 $i_{pv1}, C_{pv}, L_1, L_{p1}$ 及 R_1, R_f 与 C_{b2} 形成放电回路。因此, 可得到上述放电回路的微分方程组见附录A式(A6)。联立式(A6)中的方程组可得出 i_{L_1} 表达式如式(14)所示, 式中各参数具体表达式见式(A6)。

$$\frac{d^2 i_{L_1}}{dt^2} + \frac{(R_f + R_1)}{L_1} \frac{di_{L_1}}{dt} - \frac{1}{C_{b1} L_1} i_{L_1} = -\frac{1}{C_{b1} L_1} \left(i_{pv1} + C_{pv} \frac{du_{C_{pv}}}{dt} \right) \quad (14)$$

式中: $u_{C_{pv}}$ 为 C_{pv} 两侧电压。

考虑到 $C_{pv} < C_{b1}$, 且式(14)等号右侧为负值, 其数值较小, 为了便于分析接地故障发生后的暂态特性,

假设式(14)等号右侧约为0。此时式(14)便由二阶非齐次线性微分方程简化为二阶齐次线性微分方程, 因此, 可求得 i_{L_1} 的表达式为:

$$i_{L_1} = e^{\alpha_{03} t} [A_{03} \cos(b_{03} t) + B_{03} \sin(b_{03} t)] \quad (15)$$

式中: $\alpha_{03}, b_{03}, A_{03}, B_{03}$ 的表达式见附录A式(A7)。

对于光伏发电系统2, C_{b4}, L_2, L_{a2} 及 R_{a2}, R_2, R_f 形成放电回路; 光伏电源 $i_{pv2}, C_{pv}, L_{p2}, L_{a2}, L_2$ 及 R_{a2}, R_2, R_f 与 C_{b3} 形成放电回路。同样可得到附录A式(A8)所示的电路微分方程组。同理, 由式(A8)可得 i_{L_2} 表达式为:

$$i_{L_2} = e^{\alpha_{04} t} [A_{04} \cos(b_{04} t) + B_{04} \sin(b_{04} t)] \quad (16)$$

式中: $\alpha_{04}, b_{04}, A_{04}, B_{04}$ 的表达式见附录A式(A9)。

对于光伏发电系统 n , 由 $C_{bn}, L_{a2} - L_{an}, L_n, R_{a2} - R_{an}, R_n, R_f$ 形成放电回路; 光伏电源 $i_{pvn}, C_{pv}, L_{a2} - L_{an}, L_n, L_{pn}$ 及 $R_{a2} - R_{an}, R_n, R_f$ 与 C_{bn-1} 形成放电回路。也可得到当光伏发电系统 n 接入配电网后的电路微分方程见附录A式(A10)。同理, 由式(A10)可得 i_{L_n} 表达式为:

$$i_{L_n} = e^{\alpha_{0n} t} [A_{0n} \cos(b_{0n} t) + B_{0n} \sin(b_{0n} t)] \quad (17)$$

式中: $\alpha_{0n}, b_{0n}, A_{0n}, B_{0n}$ 的表达式见附录A式(A11)。

综上分析, 此阶段接地故障电流 i_f 为电流 $i_1, i_4, i_{L_1}, i_{L_2}, \dots, i_{L_n}$ 之和, 因此第二阶段的故障电流及其具体展开式分别如式(18)、(19)所示。

$$i_f = i_1 + i_4 + i_{L_1} + i_{L_2} + \dots + i_{L_n} \quad (18)$$

$$i_f = C_{a1} e^{\alpha_1 t} [(A_1 b_1 - B_1 \alpha_1) \sin(b_1 t) - (A_1 \alpha_1 + B_1 b_1) \cos(b_1 t)] + C_{a3} e^{\alpha_4 t} [(A_4 b_4 - B_4 \alpha_4) \sin(b_4 t) - (A_4 \alpha_4 + B_4 b_4) \cos(b_4 t)] + e^{\alpha_{03} t} [A_{03} \cos(b_{03} t) + B_{03} \sin(b_{03} t)] + e^{\alpha_{04} t} [A_{04} \cos(b_{04} t) + B_{04} \sin(b_{04} t)] + \dots + e^{\alpha_{0n} t} [A_{0n} \cos(b_{0n} t) + B_{0n} \sin(b_{0n} t)] \quad (19)$$

3) 第三阶段: 光伏电源续流阶段。

光伏电源续流阶段的时间间隔为 $t_2 - t_3$, 该阶段从光伏发电系统中电容 C_{pv} 放电结束开始。当 C_{pv} 放电结束后, 光伏电源 i_{pv} 的电流分别通过 $L_1 - L_n$ 及 $R_1 - R_n, R_f$ 流向故障点, 与 $C_{b2} - C_{bn-1}$ 分别构成回路。光伏发电系统处于稳定状态, 输出一个相对稳定的电流(其数值较小)。此时, 光伏电源 $i_{pv1} - i_{pvn}$ 向故障点提供故障电流。同时, C_{a1} 和 C_{a3} 继续放电, 此阶段等效电路图如附录A图A2(a)所示。

综上分析, 此阶段接地故障电流 i_f 为电流 $i_1, i_4, i_{pv1} - i_{pvn}$ 的叠加, 此阶段的故障电流表达式及其具体展开式分别如式(20)、(21)所示。

$$i_f = i_1 + i_4 + i_{pv1} + i_{pv2} + \dots + i_{pvn} \quad (20)$$

$$i_f = C_{a1} e^{\alpha_1 t} [(A_1 b_1 - B_1 \alpha_1) \sin(b_1 t) - (A_1 \alpha_1 + B_1 b_1) \cos(b_1 t)] + C_{a3} e^{\alpha_4 t} [(A_4 b_4 - B_4 \alpha_4) \sin(b_4 t) - (A_4 \alpha_4 + B_4 b_4) \cos(b_4 t)] + i_{pv1} + i_{pv2} + \dots + i_{pvn} \quad (21)$$

4)第四阶段:电感续流阶段。

电感续流阶段的时间间隔为 $t_3 - t_4$, 该阶段从 $C_{b2} - C_{bn-1}$ 放电结束且 VSC 中的 IGBT 续流二极管全部导通开始。随着 VSC 直流侧电容 C_{a1} 和 C_{a3} 进一步放电完成, 直流母线电压也逐渐降低, 线路等效电感 L_{a1} 和 L_d 中存储的能量已达到饱和状态。此时 VSC 中的 IGBT 续流二极管全部导通, 交流侧电流开始通过续流二极管向故障点提供电流。双端交流电网 VSC 每相桥臂流经的电流分别为 i_{D1} 、 i_{D2} 、 i_{D3} 、 i_{Da} 、 i_{Db} 、 i_{Dc} , 此阶段等效电路如附录 A 图 A2(b) 所示。

电感续流阶段 VSC₁ 直流侧电感电流 $i_1(t)$ 、VSC₂ 直流侧电感电流 $i_4(t)$ 及流经 VSC 中各相桥臂续流二极管的电流分别为:

$$i_1(t) = I_1 e^{-\frac{R_{l1} + R_l}{2L_{a1}} t} \quad (22)$$

$$i_4(t) = I_1 e^{-\frac{R_{l2} + \dots + R_{ln} + R_l + R_{l1}}{2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_d)} t} \quad (23)$$

$$i_{D1} = i_{D2} = i_{D3} = \frac{1}{3} i_1(t) \quad (24)$$

$$i_{Da} = i_{Db} = i_{Dc} = \frac{1}{3} i_4(t) \quad (25)$$

根据第一阶段的分析, 可知:

$$I_1 = C_{a1} e^{\alpha t} [(A_1 b - B_1 \alpha) \sin(bt) - (A_1 \alpha + B_1 b) \cos(bt)] \quad (26)$$

式中: α 、 b 、 A_1 、 B_1 的表达式见附录 A 式(A12)。

同理可知:

$$I_4 = C_{a3} e^{\alpha t} [(A_4 b - B_4 \alpha) \sin(bt) - (A_4 \alpha + B_4 b) \cos(bt)] \quad (27)$$

式中: α 、 b 、 A_4 、 B_4 的表达式见附录 A 式(A13)。

综上分析, 第四阶段的故障电流及其具体展开式分别如式(28)、(29)所示。

$$i_f = i_1(t) + i_4(t) \quad (28)$$

$$i_f = C_{a1} e^{-2\alpha t} [(A_1 b - B_1 \alpha) \sin(bt) - (A_1 \alpha + B_1 b) \cos(bt)] + C_{a3} e^{-2\alpha t} [(A_4 b - B_4 \alpha) \sin(bt) - (A_4 \alpha + B_4 b) \cos(bt)] \quad (29)$$

此阶段故障电流低于前面 3 个阶段, 但 VSC 中 IGBT 续流二极管在导通瞬间将会承受较大的冲击电流。

2 接地故障电阻对故障特性的影响分析

由于含分布式光伏的中压直流配电网发生接地故障时, 故障电流的峰值主要由电容放电阶段决定。根据第 1 章故障特性分析可知, 故障电流到达峰值的时间与 VSC 直流侧电容、接地故障位置、故障电阻大小等因素相关。即可由 VSC 直流侧电容、电缆线路阻抗和接地故障电阻组成的放电回路来评估故障电流达到峰值的时间。

假设 t_0 时刻发生接地故障, 由电容 C_{a1} 、电阻 R_{total} 、电感 L_{total} 及故障电阻 R_f 组成电容放电回路, 电

容 C_{a1} 上电压为 u_1 , 此阶段等效电路如图 3 所示。

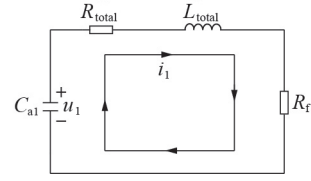


图 3 电容 C_{a1} 放电回路等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of capacitor C_{a1} discharge

当接地故障发生时, 电容 C_{a1} 放电阶段的故障回路等效电阻和电感分别为:

$$R_{total} = lR_l, \quad L_{total} = lL_l \quad (30)$$

式中: l 为 VSC 至故障点的直流母线电缆长度; R_l 和 L_l 分别为直流母线电缆每千米的等效电阻和电感。

根据图 3 中的电路回路可得到电流 i_1 的二阶微分方程为:

$$\frac{d^2 i_1(t)}{dt^2} + \frac{R_{total} + R_f}{L_{total}} \frac{di_1(t)}{dt} + \frac{i_1(t)}{L_{total} C_{a1}} = 0 \quad (31)$$

当接地故障发生的位置靠近 VSC 时, 其直流线路等效电阻 R_{total} 相对较小, 即可满足 $R_{total} + R_f < 2\sqrt{L_{total}/C_{a1}}$ 。当接地故障的位置远离 VSC 时, VSC 和故障点之间的等效电阻 R_{total} 将增加, 且线路等效电感 L_{total} 也将相应增加。接地故障期间, 故障回路的线路等效电阻很小, 电容放电阶段表现为欠阻尼过程。通过解微分方程式(31)得到:

$$i_1(t) = A_1 \cos(\omega t) e^{-\alpha t} + A_2 \sin(\omega t) e^{-\alpha t} \quad (32)$$

式中: α 、 ω 、 A_1 、 A_2 的表达式见附录 A 式(A14)。

对式(32)求导并使其等于 0, 可得到电流 i_1 达到最大值所需时间 $t_{i1(max)}$ 为:

$$t_{i1(max)} = t_0 + \frac{1}{\omega} \arctan \frac{A_2 \omega - A_1 \alpha}{A_1 \omega + A_2 \alpha} \quad (33)$$

假设 VSC₁ 与故障发生位置的距离为 d , 则 i_1 达到最大值的时间与故障发生的时间间隔 t_d 为:

$$t_d = t_{i1(max)} - t_0 = \frac{1}{\omega'} \arctan \frac{A_2' \omega' - A_1 \alpha}{A_1 \omega' + A_2' \alpha} \quad (34)$$

式中: α 、 ω' 、 A_1 、 A_2' 的表达式见附录 A 式(A15)。

由式(34)可得到故障电流达到峰值的时间间隔 t_d 与故障位置 d 及故障电阻 R_f 的关系, 如图 4 所示。

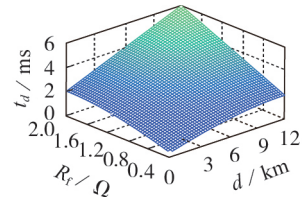


图 4 t_d 、 d 、 R_f 之间的关系

Fig.4 Relationship among t_d , d and R_f

由式(32)、(34)知, 当接地故障电阻 R_f 增大时, 故障电流的峰值会下降, 但到达峰值的时间 t_d 会增

大。由图4可知, t_d 会随故障电阻 R_f 的增加而增大。

3 含分布式光伏的中压直流配电网接地故障仿真结果分析

3.1 不考虑控制策略影响下中压直流母线发生接地故障时的仿真结果分析

为了验证上述接地故障理论分析的正确性, 利用 PSCAD / EMTDC 仿真软件搭建了如附录 A 图 A3 所示的含 3 个分布式光伏发电系统的中压直流配电网仿真模型, 主要仿真参数如附录 A 表 A1 所示。

假设系统在 $t_0=0.1$ s 时刻发生单极接地故障, 且光伏发电系统 Boost 变换器、VSC₁ 和 VSC₂ 中开关器件 IGBT 因自我保护功能而快速闭锁, 此时不考虑各变换器控制策略时的仿真结果如附录 A 图 A4 所示。在第一阶段(电容放电阶段), 在 VSC₁ 直流侧电容 C_{a1} 和 VSC₂ 直流侧电容 C_{a3} 及 Boost 变换器直流母线电容 C_{b1} 、 C_{b4} 共同放电影响下, 直流母线电压 u_{dc} 自 20 kV 迅速下降, 如图 A4(a) 所示; 故障电流 i_f 从 0 以较快速度上升至 9.4 kA, 如图 A4(c) 所示; 同时, 光伏发电系统 1 中 Boost 变换器直流母线电容电压 u_b 从 20 kV 降至 0 后, 以振荡的形式逐渐衰减, 并经历振荡放电过程, 如图 A4(b) 所示。在第二阶段(光伏电源多回路供电阶段), 直流母线电压 u_{dc} 出现振荡, 故障电流 i_f 达到峰值。在第三阶段(光伏电源续流阶段), 故障电流 i_f 以振荡的形式逐渐衰减。在第四阶段(电感续流阶段), 故障电流 i_f 以较小数值上下浮动。且在故障达到稳态后 VSC₁ 中 IGBT 续流二极管 D_1 的电流 i_{D1} 依然向故障点提供电流, 对二极管有较大冲击, 严重威胁二极管的安全。

为了验证第一阶段和第二阶段故障特性理论分析的正确性, 利用 MATLAB 软件得到了式(13)和式(19)中故障电流 i_f 的计算结果, 如图 A4(m) 中红色曲线所示, 其理论计算参数与表 A1 中一致。图中, 假设中压直流母线在 0.1 s 时发生正极接地故障, 故障电流 i_f 迅速上升, 在 0.108 s 时故障电流 i_f 在第二阶段达到峰值 9.55 kA, 如图 A4(c) 所示。通过对比图 A4(m) 中故障电流 i_f 计算值和仿真值可知, 仿真结果故障电流 i_f 峰值 9.6 kA 与理论计算结果故障电流 i_f 峰值非常接近。由此可知, 前 2 个故障阶段的理论计算结果和仿真结果几乎一致。

3.2 考虑控制策略影响下中压直流母线发生接地故障时仿真结果分析

当光伏发电系统 Boost 变换器采用最大功率点跟踪控制方法、VSC 采用 PWM 控制方法时, 中压直流母线发生单极接地故障的系统仿真结果如附录 A 图 A5 所示。故障电流和直流母线电压在变换器采用控制策略与不采用控制策略情况下对比如图 5 所示。

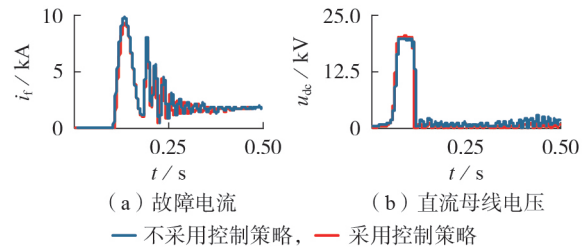


图5 采用控制策略前、后故障电流和直流母线电压的仿真结果

Fig.5 Simulative results of DC link voltage and fault current before and after adopting control strategy

假设系统在 $t_0=0.1$ s 时刻发生接地故障, 故障电流 i_f 在第二阶段达到峰值 9.43 kA, 其故障电流与光伏发电系统无控制策略时相比上升速度相同, 峰值相差约 0.12 kA, 达到峰值后衰减波动略有减小。直流母线电压 u_{dc} 与无控制策略时相比下降速度相同, 下降到达零点的时间约缩短 0.13 ms, 到达零点后的波动略有减小。

当含分布式光伏的中压直流配电网发生接地故障时, 基于仿真结果对比光伏 Boost 变换器、VSC 采用控制策略时和不采用控制策略时对故障特性的影响可知。

1) 接地故障发生后, 若变换器不采用控制策略时, 则在二极管续流阶段, 故障电流仍会通过分布式光伏发电系统 Boost 变换器、VSC 中的 IGBT 续流二极管与故障点形成放电回路, 且流经续流二极管的故障电流可能会造成二极管损坏, 威胁变换器的安全运行; 当采用变换器控制策略时, 在接地故障的稳定阶段, 故障电流和电容电压值略小于不采用控制策略时的故障电流和电容电压值。

2) 无论是否采用变换器控制策略, 各分布式光伏 Boost 变换器、VSC 的直流母线电容均会快速放电以提供故障电流, 且故障电流会很快达到峰值; 且接地故障电流峰值及故障电流到达峰值的时间主要由电容放电阶段决定, 并与 VSC 直流侧电容 $C_{a1} - C_{a4}$ 和光伏 Boost 变换器直流侧电容 $C_{b1} - C_{b4}$ 的大小相关, 即分布式光伏 Boost 变换器、VSC 的控制方式对接地故障电流的峰值及故障电流到达峰值的时间影响很小。

3.3 接地故障电阻对故障特性的影响仿真结果

假设 VSC₁ 直流侧电容 C_{a1} 的数值为固定值, 由式(34)可知, 当中压直流配电网发生接地故障时, 接地故障电流 i_f 到达最大值时距故障发生的时间间隔 t_d 主要受故障点位置及接地故障电阻影响。本文考虑同种条件下接地故障电阻发生变化时对故障特性的影响, 图 6 为接地故障电阻分别为 0.4、1.2、2.0 Ω 时中压直流母线电压 u_{dc} 和故障电流 i_f 的仿真结果。

由图 6 可知, 假设系统在 $t_0=0.1$ s 时刻发生接地故障, 随着接地故障电阻的增大, 直流母线电压 u_{dc}

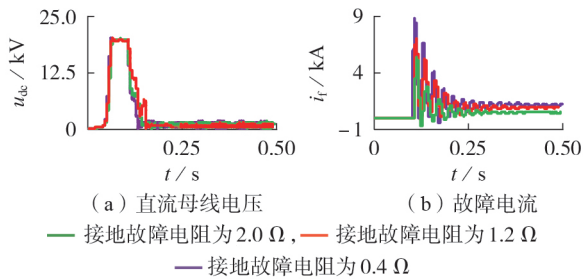


图 6 不同接地故障电阻对直流母线电压及故障电流的影响仿真结果

Fig.6 Simulative results of influence of different ground fault resistances on DC link voltage and fault current

的下降速度会减慢,电压下降至 0 的时间会变长。此外,故障电流 i_f 的上升速度会减慢,达到峰值的时间会变长,故障电流的峰值显著降低。因此,当分布式光伏接入中压直流配电网后,在设计相应的中压直流接地故障保护方案时需要充分考虑接地故障电阻对故障特性的影响。

4 结论

分布式光伏接入中压直流配电网后,若发生单极接地故障,则存在故障电流上升速度快、幅值高及影响机理不明确的问题。本文推导得到含分布式光伏的中压直流配电网在发生单极接地故障后,直流母线电压和各故障阶段故障电流的表达式;并分析了故障电流幅值及到达峰值时间的影响因素,保障了含分布式光伏的中压直流配电网安全可靠运行。主要结论如下。

1) 分布式光伏接入中压直流配电网后,若发生单极接地故障,则分布式光伏发电系统会增大故障电流的大小并缩短其达到峰值的时间。同时,各个光伏发电系统中 Boost 变换器直流母线电容电压会以较快的速度跌落至 0。

2) 单极接地故障发生后,中压直流母线电压自 20 kV 下降到 0 的瞬态变化时间随接地故障电阻的增大而变长。

3) 含分布式光伏的中压直流配电网单极接地的接地故障电阻会对故障电流产生较大影响。随着接地故障电阻的增大,故障电流的峰值会降低,且达到峰值所用的时间会减少。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] LEE J Y, KIM H S, JUNG J H. Enhanced dual-active-bridge DC-DC converter for balancing bipolar voltage level of DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10399-10409.

[2] 郑峰, 张锦松, 林燕贞, 等. 基于新型柔性故障限流器的多端直流配电网故障隔离策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 73-82.

ZHENG Feng, ZHANG Jinsong, LIN Yanzhen, et al. Fault isolation strategy for multi-terminal DC distribution network based on novel flexible fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 73-82.

- [3] FENG Xianyong, XIONG Q, WARDELL D, et al. Extra-fast DC distribution system protection for future energy systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4): 3421-3430.
- [4] 姜涛, 张东辉, 李雪, 等. 含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 102-109, 125. JIANG Tao, ZHANG Donghui, LI Xue, et al. Distributed optimal control of voltage in active distribution network with distributed photovoltaic[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 102-109, 125.
- [5] 贾科, 陈聪, 刘子奕, 等. 基于单端电流暂态量的柔性直流配电网保护及其整定[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 144-152. JIA Ke, CHEN Cong, LIU Ziyi, et al. Protection of flexible DC distribution network based on single-end current transient and its setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 144-152.
- [6] 贾科, 李俊涛, 陈金锋, 等. 多端口分布式光伏接入直流配电网系统整体故障穿越协调控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 175-182. JIA Ke, LI Juntao, CHEN Jinfeng, et al. Integrated fault ride through control for multi-port DC distribution system with distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 175-182.
- [7] 樊肖杰, 迟永宁, 马士聪, 等. 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2859-2870. FAN Xiaojie, CHI Yongning, MA Shicong, et al. Research and application of key technologies and technical standards for large-scale offshore wind farms connecting to power grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2859-2870.
- [8] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11. RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [9] SHUAI Zhikang, HE Dong, XIONG Zhijie, 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.
- [10] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8. XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [11] 刘泽洪, 郭贤珊. 含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3595-3603. LIU Zehong, GUO Xianshan. Operating characteristics research and engineering application of voltage source converter based DC grid with renewable source connected[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3595-3603.
- [12] 王毅, 于明, 张丽荣. 环形直流微网短路故障分析及保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 7-14. WANG Yi, YU Ming, ZHANG Lirong. Short circuit fault analysis and protection scheme for looped DC microgrid[J]. Elec-

- tric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):7-14.
- [13] 张庆, 于光远, 秦昌龙. 交流侧接地方式对多端柔性直流配电网保护配置的影响[J]. 南方能源建设, 2018, 5(4):78-85.
ZHANG Qing, YU Guangyuan, QIN Changlong. Effect of AC-side grounding mode on protection configuration of multi-terminal flexible DC distribution network [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(4):78-85.
- [14] 罗飞, 焦在滨, 马钊, 等. 直流配电网故障分析和继电保护综述[J]. 供用电, 2018, 35(6):3-11.
LUO Fei, JIAO Zaibin, MA Zhao, et al. Review of fault analysis and relay protection of DC distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6):3-11.
- [15] 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.
- [16] ZHANG Zhiming, CHEN Qing, XIE Ranran, et al. The fault analysis of PV cable fault in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1):486-496.

作者简介:

何东(1986—),男,讲师,博士,主要研究方向为直流配电网故障特性分析及保护控制(**E-mail**:hd861116@163.com);

徐明章(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为含分布式光伏的中压直流配电网故障特性分析(**E-mail**:1743740847@qq.com);

兰征(1985—),男,副教授,博士,主要研究方向为分布式电源并网技术、微电网控制(**E-mail**:lanzhang20@foxmail.com)。

(编辑 任思思)

Analysis of grounding fault transient characteristics of medium-voltage DC distribution network with distributed photovoltaic

HE Dong¹, XU Mingzhang¹, LAN Zheng¹, WANG Wei², ZENG Jinhui¹, YU Xueping¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: When the distributed photovoltaic(PV) is connected to the direct current(DC) distribution network, the fault current distribution presents new characteristics. For this, the transient characteristics and influence mechanism of single pole grounding fault of DC-bus in medium-voltage DC distribution network with distributed PV are analyzed. The single pole grounding fault response process is divided into four stages: DC-side capacitor discharging stage, PV generator multiloop power supplying stage, PV generator freewheeling stage and inductance freewheeling stage. Based on the transient characteristics of the above four stages, the time domain expressions of the DC-side capacitor voltage and fault current in the process of each fault stage are derived. By analyzing the typical characteristics of fault current, it can be found that the magnitude of the fault resistance has a great influence on the amplitude of the fault current and the time to reach the peak. Finally, a simulation model of ± 10 kV double-terminal DC distribution network with distributed PV is built in PSCAD/EMTDC, which verifies the correctness of the theoretical analysis.

Key words: distributed photovoltaic; DC distribution network; grounding fault; fault current; fault characteristic

附录 A

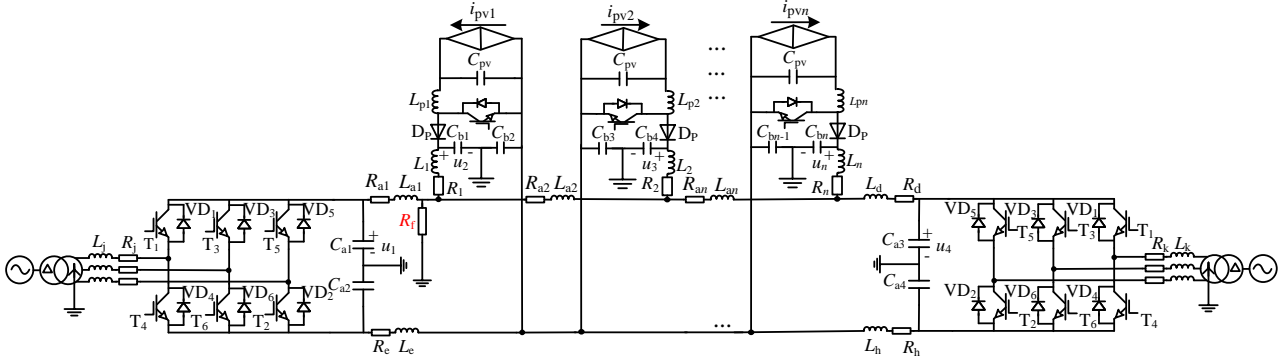


图 A1 中压直流母线发生接地故障时等效电路图

Fig.A1 Equivalent circuit diagram of medium voltage DC bus when grounding fault occurs

$$\begin{cases} \alpha_1 = -\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1}}, & b_1 = \sqrt{\frac{1}{L_{a1}C_{a1}} - \left(\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1}}\right)^2} \\ A_1 = U_{01}, & B_1 = \frac{(R_{a1} + R_f) U_{01} C_{a1} - 2L_{a1} I_{01}}{\sqrt{4L_{a1}C_{a1} - (R_{a1} + R_f)^2 C_{a1}^2}} \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = -\frac{R_1 + R_f}{2L_1}, & b_2 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_{b1}} - \left(\frac{R_1 + R_f}{2L_1}\right)^2} \\ A_2 = U_{02}, & B_2 = \frac{(R_1 + R_f) U_{02} C_{b1} - 2L_1 I_{02}}{\sqrt{4L_1 C_{b1} - (R_1 + R_f)^2 C_{b1}^2}} \end{cases} \quad (A2)$$

$$\begin{cases} \alpha_3 = -\frac{R_2 + R_{a2} + R_f}{2(L_2 + L_{a2})}, & b_3 = \sqrt{\frac{1}{(L_2 + L_{a2})C_{b4}} - \left[\frac{R_2 + R_{a2} + R_f}{2(L_2 + L_{a2})}\right]^2} \\ A_3 = U_{03}, & B_3 = \frac{(R_2 + R_{a2} + R_f) U_{03} C_{b4} - 2(L_2 + L_{a2}) I_{03}}{\sqrt{4(L_2 + L_{a2})C_{b4} - (R_2 + R_{a2} + R_f)^2 C_{b4}^2}} \end{cases} \quad (A3)$$

$$\begin{cases} \alpha_4 = -\frac{R_{a2} + \dots + R_{an} + R_d + R_f}{2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_d)}, & A_4 = U_{04} \\ b_4 = \sqrt{\frac{1}{(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_d)C_{a3}} - \left[\frac{R_{a2} + \dots + R_{an} + R_d + R_f}{2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_d)}\right]^2} \\ B_4 = \frac{(R_{a2} + \dots + R_{an} + R_d + R_f) U_{04} C_{a3} - 2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_d) I_{04}}{\sqrt{4(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_d)C_{a3} - (R_{a2} + \dots + R_{an} + R_d + R_f)^2 C_{a3}^2}} \end{cases} \quad (A4)$$

$$\begin{cases} \alpha_n = -\frac{R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f}{2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n)}, & A_n = U_{0n}, \\ b_n = \sqrt{\frac{1}{(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n)C_{bn}} - \left[\frac{R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f}{2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n)}\right]^2}, \\ B_n = \frac{(R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f) U_{0n} C_{bn} - 2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n) I_{0n}}{\sqrt{4(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n)C_{bn} - (L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n)^2 C_{bn}^2}} \end{cases} \quad (A5)$$

式中： U_{01} 和 I_{01} 分别为接地故障发生的初期电容 C_{a1} 上的电压、电流； U_{02} 和 I_{02} 分别为接地故障发生的初期电容 C_{b1} 上的电压和电流； U_{03} 和 I_{03} 分别为接地故障发生的初期电容 C_{b4} 上的电压和电流； U_{04} 和 I_{04} 分别为接地故障发生的初期电容 C_{a3} 上的电压和电流； U_{0n} 和 I_{0n} 分别为接地故障发生的初期电容 C_{bn} 上的电压和电流。

$$\begin{cases} \frac{du_{C_{b1}}}{dt} = \frac{1}{C_{b1}} i_{L_1} - \frac{1}{C_{b1}} i_{L_{p1}} \\ \frac{du_{C_{pv}}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{L_{p1}} - \frac{1}{C_{pv}} i_{pv1} \\ \frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{1}{L_1} u_{C_{b1}} - \frac{(R_f + R_l)}{L_1} i_{L_1} \\ \frac{di_{L_{p1}}}{dt} = \frac{1}{L_1 + L_{p1}} u_{C_{pv}} - \frac{(R_f + R_l)}{L_1 + L_{p1}} i_{L_{p1}} - \frac{1}{L_1 + L_{p1}} u_{C_{b2}} \end{cases} \quad (A6)$$

$$\begin{cases} \alpha_{03} = -\frac{R_l + R_f}{2L_1}, \quad b_{03} = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_{b1}} + \left(\frac{R_l + R_f}{2L_1}\right)^2} \\ A_{03} = I_{03}, \quad B_{03} = \frac{\sqrt{C_{b1}} [2U_{03} + I_{03} (R_l + R_f)]}{2\sqrt{L_1 + (R_l + R_f)^2}} \end{cases} \quad (A7)$$

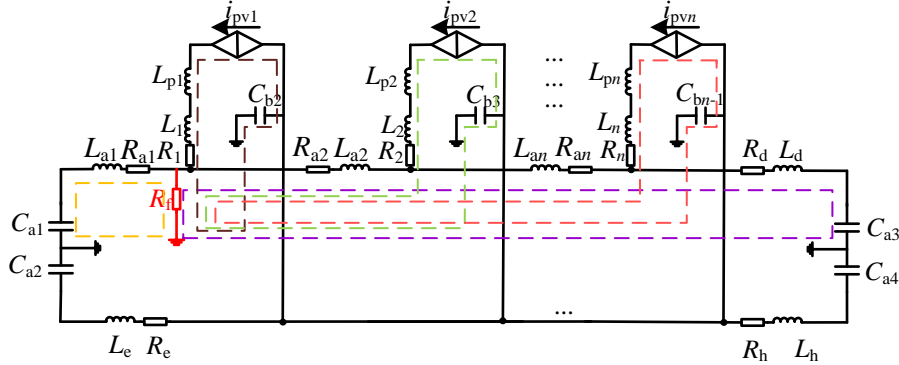
$$\begin{cases} \frac{du_{C_{b4}}}{dt} = \frac{1}{C_{b4}} i_{L_2} - \frac{1}{C_{b4}} i_{L_{p2}} \\ \frac{du_{C_{pv}}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{L_{p2}} - \frac{1}{C_{pv}} i_{pv2} \\ \frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{1}{L_{a2} + L_2} u_{C_{b4}} - \frac{(R_f + R_{a2} + R_2)}{L_{a2} + L_2} i_{L_2} \\ \frac{di_{L_{p2}}}{dt} = \frac{1}{L_{a2} + L_2 + L_{p2}} u_{C_{pv}} - \frac{(R_f + R_{a2} + R_2)}{L_{a2} + L_2 + L_{p2}} i_{L_{p2}} - \frac{1}{L_{a2} + L_2 + L_{p2}} u_{C_{b3}} \end{cases} \quad (A8)$$

$$\begin{cases} \alpha_{04} = -\frac{R_{a2} + R_2 + R_f}{2L_2(1+L_{a2})}, \quad b_{04} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_{b4}(1+L_{a2})} + \left[\frac{R_{a2} + R_2 + R_f}{2L_2(1+L_{a2})}\right]^2} \\ A_{04} = I_{04}, \quad B_{04} = \frac{\sqrt{C_{b4}} [2U_{04}(1+L_{a2}) + I_{04}(R_{a2} + R_2 + R_f)]}{\sqrt{4L_2(1+L_{a2}) + (R_{a2} + R_2 + R_f)^2 C_{b4}}} \end{cases} \quad (A9)$$

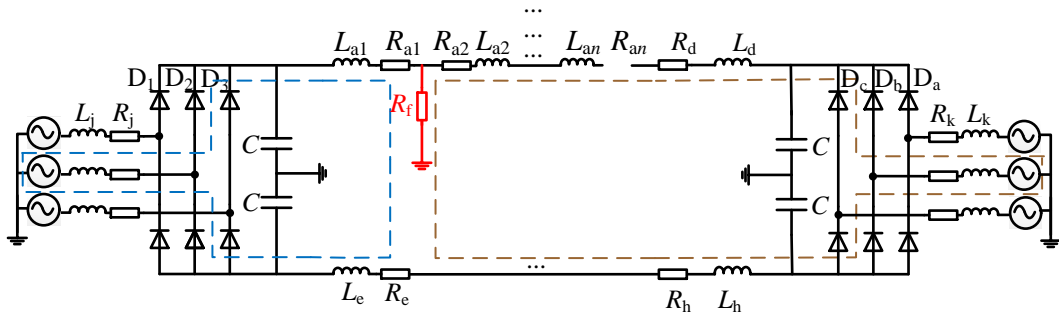
$$\begin{cases} \frac{du_{C_{bn}}}{dt} = \frac{1}{C_{bn}} i_{L_n} - \frac{1}{C_{bn}} i_{L_{pn}} \\ \frac{du_{C_{pv}}}{dt} = \frac{1}{C_{pv}} i_{L_{pn}} - \frac{1}{C_{pv}} i_{pvn} \\ \frac{di_{L_{pn}}}{dt} = \frac{1}{L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n} u_{C_{bn}} - \frac{(R_f + R_{a2} + R_{an} + R_n)}{L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n} i_{L_n} \\ \frac{di_{L_{pn}}}{dt} = \frac{u_{C_{pv}}}{L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n + L_{pn}} - \frac{(R_f + R_{a2} + R_{an} + R_n) i_{L_{pn}}}{L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n + L_{pn}} - \frac{u_{C_{bn-1}}}{L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n + L_{pn}} \end{cases} \quad (A10)$$

$$\begin{cases} \alpha_{0n} = -\frac{R_f + R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n}{2L_n(1 + L_{a2} + \dots + L_{an})}, A_{0n} = I_{0n} \\ b_{0n} = \sqrt{\frac{1}{L_n C_{bn}(1 + L_{a2} + \dots + L_{an})} + \left[\frac{R_f + R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n}{2L_n(1 + L_{a2} + \dots + L_{an})}\right]^2} \\ B_{0n} = \frac{\sqrt{C_{bn}}[2U_{0n}(1 + L_{a2} + \dots + L_{an}) + I_{0n}(R_f + R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n)]}{\sqrt{4L_n(1 + L_{a2} + \dots + L_{an}) + (R_f + R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n)^2 C_{bn}}} \end{cases} \quad (A11)$$

式中： I_{03} 、 U_{03} 、 I_{04} 、 U_{04} 、 \dots 、 I_{0n} 、 U_{0n} 分别为接地故障开始时刻电感 L_3 、 L_4 、 \dots 、 L_n 上的电流和电压值。



(a)光伏电源续流阶段



(b)电感续流阶段

图 A2 含分布式光伏的中压直流配电网在不同故障阶段的等效电路图

Fig.A2 Equivalent circuit diagram of medium voltage dc distribution network with distributed photovoltaics at different fault stages

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1}}, b = \sqrt{\frac{1}{L_{a1} C_{a1}} - \left(\frac{R_{a1} + R_f}{2L_{a1}}\right)^2} \\ A_1 = U_{01}, B_1 = \frac{(R_{a1} + R_f) U_{01} C_{a1} - 2L_{a1} I_{01}}{\sqrt{4L_{a1} C_{a1} - (R_{a1} + R_f)^2 C_{a1}^2}} \end{cases} \quad (A12)$$

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f}{2(L_e + L_{a2})}, A_4 = U_{04} \\ b = \sqrt{\frac{1}{(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n) C_{a3}} - \left[\frac{R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f}{2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n)}\right]^2} \\ B_4 = \frac{(R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f) U_{04} C_{a3} - 2(L_{a2} + \dots + L_{an} + L_n) I_{04}}{\sqrt{4(L_e + L_{a2}) C_{a3} - (R_{a2} + \dots + R_{an} + R_n + R_f)^2 C_{a3}^2}} \end{cases} \quad (A13)$$

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_{\text{total}} + R_f}{2L_{\text{total}}}, A_2 = \omega \frac{u_1 - R_{\text{total}} A_1}{L_{\text{total}} + \alpha A_1} \\ \omega = \sqrt{\frac{1}{L_{\text{total}} C_{a1} - [(R_{\text{total}} + R_f) / 2L_{\text{total}}]^2}}, A_1 = I_0(t_0) \end{cases} \quad (\text{A14})$$

式中： $I_0(t_0)$ 为故障发生的初始时刻电容 C_{a1} 的电流。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R_{\text{total}} + R_f}{2L_{\text{total}}}, A_2' = \frac{\omega'(U_1 - dR_{\text{total}} A_1)}{dL_{\text{total}} + \alpha A_1} \\ \omega' = \sqrt{\frac{1}{dL_{\text{total}} C_{a1} - (\frac{R_{\text{total}} + R_f}{2L_{\text{total}}})^2}}, A_1 = I_0(t_0) \end{cases} \quad (\text{A15})$$

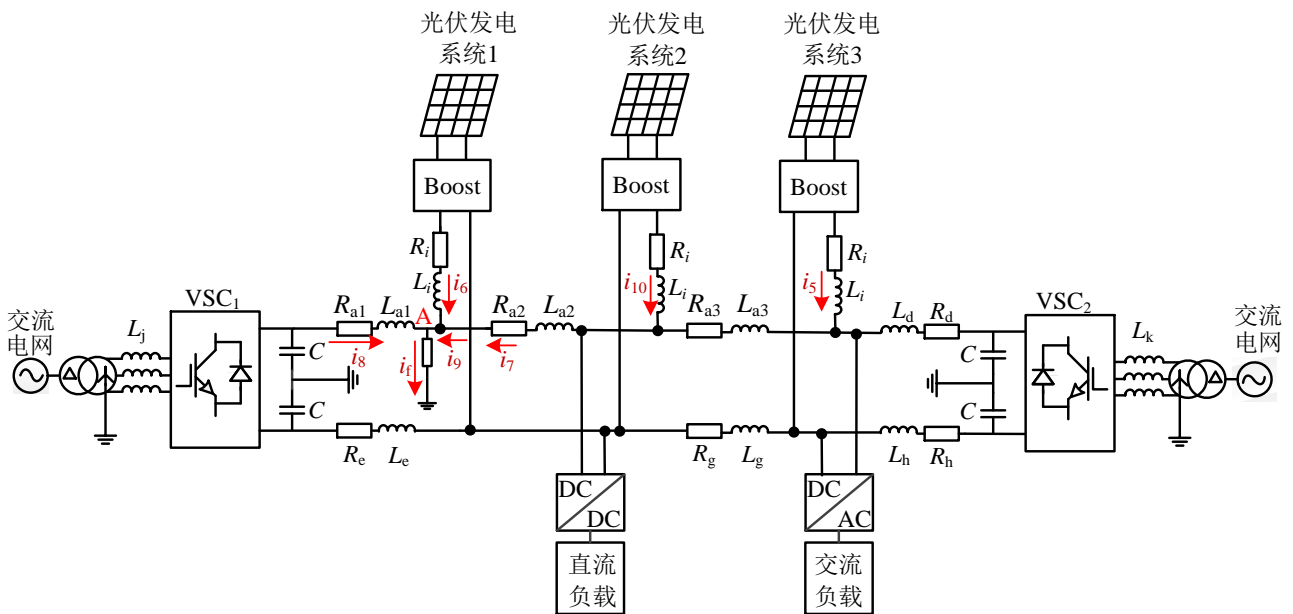


图 A3 含分布式光伏的中压直流配电网接地故障仿真模型等效电路图

Fig.A3 Equivalent circuit diagram of ground fault simulation model of medium voltage DC distribution network with distributed photovoltaics

图 A3 中，故障点 A 距离左侧 VSC₁ 的距离为 3km、距离右侧 VSC₂ 的距离为 12km、距离光伏发电系统 1 为 3km、距离光伏发电系统 2 为 6km、距离光伏发电系统 3 为 9km； R_i 为相应距离长度的线路等效电阻， L_i 为相应距离长度的线路等效电感； i_6 为光伏发电系统 1 的放电电流， i_7 为光伏发电系统 2 的放电电流及 VSC₂ 侧放电电流之和； i_8 为 VSC₁ 侧放电电流， i_{10} 为光伏发电系统 2 的放电电流； i_5 为光伏发电系统 3 的放电电流， i_f 为接地故障电流； u_{dc} 为直流母线电压； u_b 为光伏发电系统 1 中 Boost 变换器母线电压； V_{pv} 为光伏发电系统 1 输出电压； i_{D1} 为 VSC₁ 中 IGBT 续流二极管 D₁ 的电流。

表 A1 含分布式光伏的中压直流配电网仿真模型主要参数
 Table A1 Main parameters of simulation model of medium-voltage DC distribution network with distributed photovoltaics

主要参数	参数值
交流侧电源	35 kV
直直接地故障电阻 R_f	0.02 Ω
中压直流侧母线电压 V_{dc}	± 10 kV
双端 VSC 直流母线电容 C	1000 μ F
双端 VSC 直流侧额定电压	± 10 kV
VSC ₁ 额定有功功率	5 MW
VSC ₂ 额定有功功率	2 MW
Boost 变换器稳压电容 C_{pv}	1000 μ F
Boost 变换器电路电感	1 mH
等效直流线路单位长度电阻 R_l	0.15 Ω /km
等效直流线路单位长度电感 L_l	0.34 mH/km

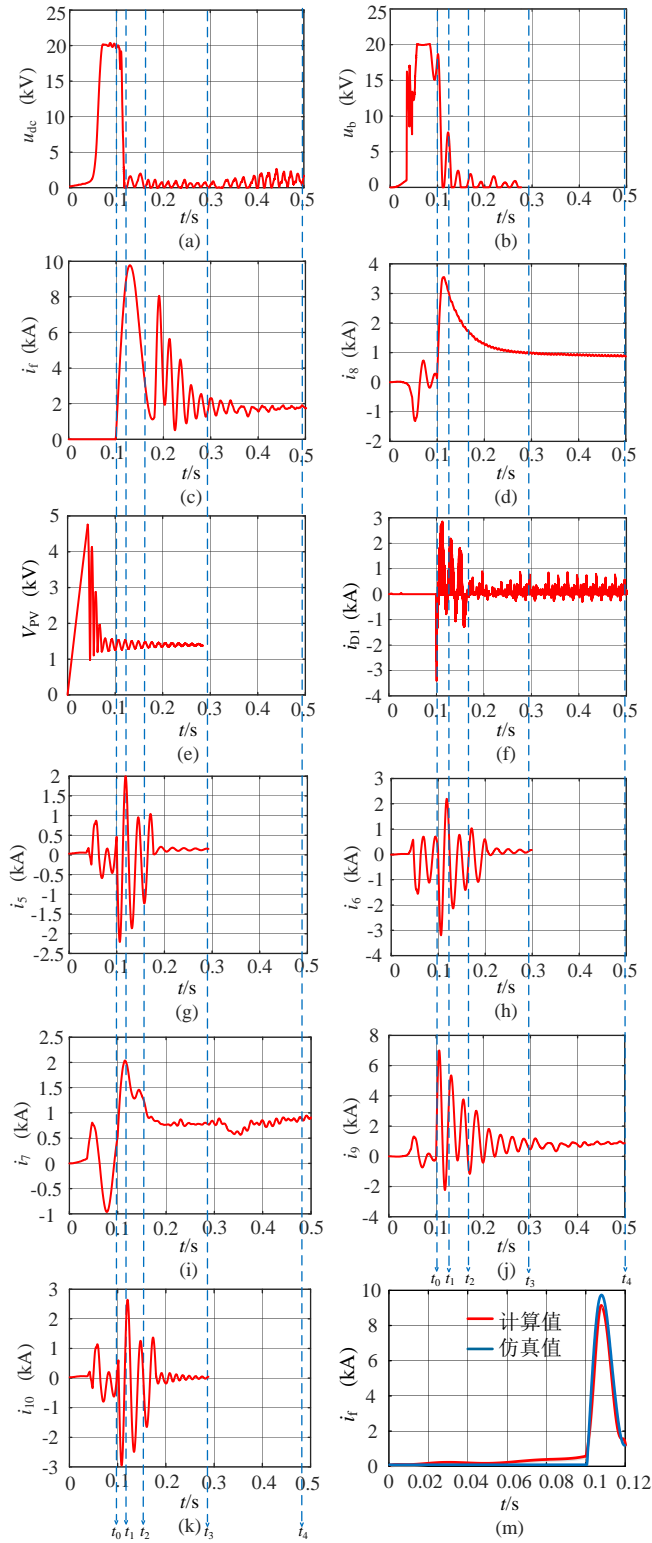


图 A4 不考虑控制策略影响下中压直流配电网发生接地故障时仿真结果图

Fig.A4 Simulative results diagram of ground fault in medium-voltage dc distribution network without considering the influence of control strategy

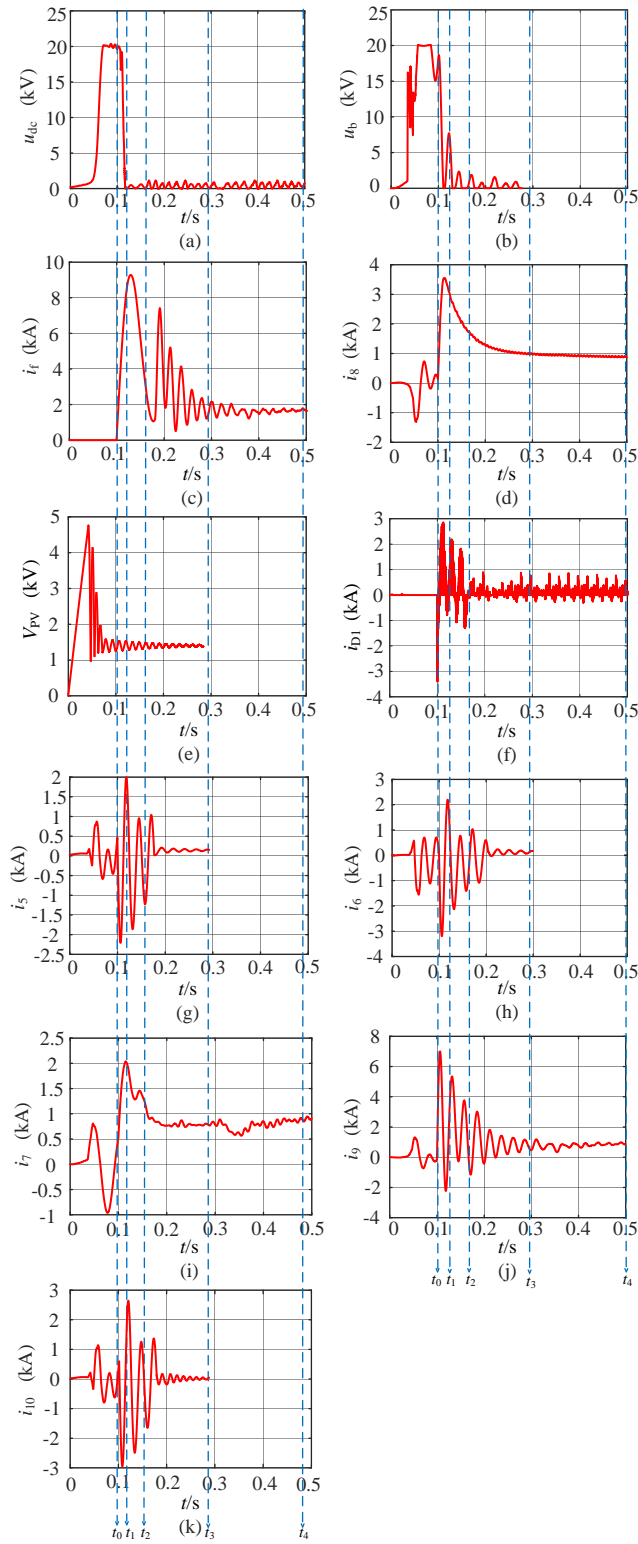


图 A5 考虑控制策略影响下中压直流配电网发生接地故障时仿真结果图

Fig.A5 Simulative results of ground fault in medium-voltage dc distribution network considering control strategy