

DOI: 10.7667/PSPC170382

# 电动汽车充电站的短路故障分析与保护

徐歌, 肖仕武, 丛明一

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 电动汽车充电站的功率在电力系统中占有的比重逐渐增大, 其站内故障特性与保护控制策略对充电站及其所在配电网的安全运行十分重要。针对典型直流充电站, 首先介绍了其拓扑结构及 AC/DC 换流器和 DC/DC 变换器的结构与控制策略。然后深入分析研究站内发生交流进线三相短路和直流极间短路故障时的动态过程, 总结其故障特征并推导出故障电压电流的计算方法。同时在 PSCAD/EMTDC 中搭建相应仿真模型, 验证了分析的正确性。最后对充电站进行了保护配置分析。

**关键词:** 电动汽车; 充电站; 故障分析; 短路电流; 保护

## Short-circuit fault analysis and protection for electric vehicle charging and discharging station

XU Ge, XIAO Shiwu, CONG Mingyi

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** As the power proportion of Electric Vehicle (EV) charging and discharging station is gradually increasing in power system, the fault characteristics and protection configuration of EV charging and discharging station become more important to the safety of power grid and the station. Firstly, based on typical DC charging and discharging station, the station typology structure and the structure and control strategy of AC/DC converter and DC/DC converter are introduced, then the dynamic process of three-phase and inter-electrode short-circuit faults in the station is analyzed intensively, their main features are given, and the method of calculating fault voltages and currents is also discussed. The simulation model established in PSCAD/EMTDC verifies the correctness of the analysis. Finally, the protection setting of the charging and discharging station is analyzed.

This work is supported by National Key Research and Development Project of China (No. 2016YFB0101900).

**Key words:** electric vehicle (EV); charging and discharging station; fault analysis; short-circuit current; protection

## 0 引言

随着环境污染与能源危机的日益严重, 电动汽车以其节能、环保的优势逐渐受到世界各国的关注和大力发展, 电动汽车的配套充电设施也开始大量投入建设, 主要包括各式充电桩和充电站, 其中电动汽车充电站成为汽车工业和能源产业发展的重点。截至 2016 年底, 我国电动汽车充电桩已达到 20 万个<sup>[1]</sup>, 《电力发展“十三五”规划》指出“加快充电设施建设, 促进电动汽车发展, 到 2020 年, 新增集中式充电站超过 1.2 万座, 分布式充电桩超过 480 万个”。目前电动汽车充电站主要有交流充

电站和直流充电站两种形式。直流充电站具有充电功率大、输出电压电流范围广和充电时间短的优点, 且能够实现动力电池能量向电网的回送, 更有利于电动汽车与电网互动技术(Vehicle to Grid, V2G)的应用以及储能和光伏发电的集成配置, 形成充放储一体化的充电站<sup>[2]</sup>。

国内对电动汽车充电站的研究主要有大规模电动汽车充电站对电网的影响<sup>[3-5]</sup>、电动汽车充电站的规划方案<sup>[6-7]</sup>和有序充放电控制策略<sup>[8-9]</sup>等。在充电安全保护方面, 文献[2]分析了基于非隔离型变换器的直流充电站的故障特性; 文献[10]介绍了一种电动汽车充换储放一体化示范电站的常规电流速断保护方法; 文献[11]对基于三相不可控整流桥的仅有充电功能的充电机进行建模仿真, 研究了充电

负荷对配网继电保护的影响, 提出基于无功功率突变量启动的过流保护方案; 文献[12]针对 HVDC 网络研究了其直流故障特性及故障隔离方法; 文献[13]研究了直流充电站不同拓扑结构对充电安全的影响。

在电动汽车充电站的快速发展应用中, 其站内故障后的电气特性及系统保护配置关系着电动汽车、充电站及其所在配电网的安全稳定运行, 目前少有文章对站内的故障动态过程进行深入分析研究, 也没有明确提出适合充电站的保护配置方案。文献[14-15]对直流配电线路中的电压源换流器直流侧极间短路进行了故障分析研究, 但没有涉及直流变换部分的影响。本文针对基于 V2G 技术、采用电压源型 AC/DC 换流器和全桥隔离型 DC/DC 变换器的直流充电站, 从电力电子器件工作层面深入分析站内发生交流侧三相短路和直流侧极间短路时的故障发展动态过程, 总结其故障特征推导出故障电压电流的计算公式, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建相应的仿真模型, 验证分析了其正确性, 为充电站的保护方案设计提供理论依据, 最后分析了充电站针对上述故障的保护配置方法。

## 1 充电站的电气拓扑结构

电动汽车充电站电气拓扑结构的变化影响故障特性的动态过程及传播特性, 本文以图 1 所示的充电站的典型拓扑结构为例进行详细分析。配电 10 kV 三相交流电经 10 kV/0.38 kV 变压器、LC 滤波器接入双向 AC/DC 换流器, 换流器输出高压直流, 经多个双向直流变换器(Bi-directional DC/DC Converter)降压调整接入电动汽车电池组。AC/DC 和 DC/DC 变换器通过控制策略的切换配合, 实现能量在电网和动力电池间的双向流动。

AC/DC 换流器为电压源型换流器 (Voltage Sourced Converter, VSC), 采用基于  $dq$  轴的功率解耦双闭环控制策略(该控制方法可以实现换流器有功无功的独立控制), 外环为功率环, 内环为电流环,

利用脉宽调制法(PWM)实现直流侧电压的恒定以及站内无功为 0。为保障动力电池的电气绝缘, 双向 DC/DC 变换器选择隔离型双向全桥直流变换器, 充电时通过移相控制高压侧 IGBT 的通断, 低压侧二极管续流, 能量从电网流向动力电池; 放电时通过 PWM 控制低压侧 IGBT 的开断, 高压侧二极管续流, 能量由动力电池馈入电网。站内通过切换 DC/DC 变换器的控制策略可选择恒压、恒流、分段式充电和恒流放电的工作方式。一般动力电池的内阻、端口电压与其工作温度、荷电状态 SOC 等因素有关, 但在故障分析中, 由于时间短暂, 动力电池电气参数的变化可忽略不计, 只将其看作内阻固定的恒压源。

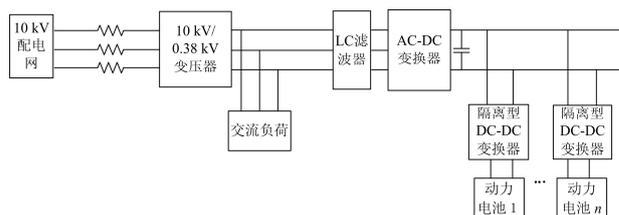


图 1 电动汽车充放电系统典型拓扑结构

Fig. 1 Typical topological structure of EV charging and discharging system

## 2 不同位置短路故障分析

充电站内的故障可分为直流侧故障和交流侧故障。交流侧故障主要包括三相对称故障以及单相接地、相间短路等不平衡故障; 直流侧故障有极间短路、极地短路和断线故障。此外, 站内故障还包括 AC/DC 换流器、DC/DC 变换器的故障, 由于变换器内部故障的保护主要由装置本身来完成, 这里就不多作讨论。本文主要对站内对称性故障(三相短路与极间短路)的动态过程作详细分析。图 2 为充电站的等效电路图,  $k_1$ 、 $k_2$  分别为三相短路和极间短路故障的位置。

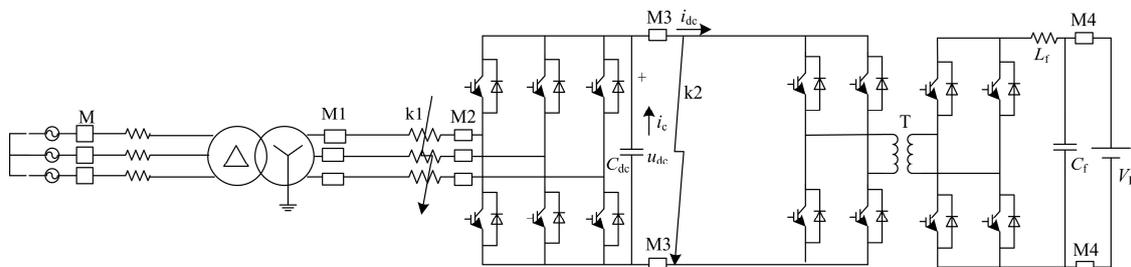


图 2 充电站等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of charging and discharging station

## 2.1 交流侧三相短路故障

变压器与 AC/DC 换流器之间的线路发生金属性三相短路故障后, 故障点电压较低, 电路可分为交流侧和直流侧两部分。直流侧部分电路需根据充放电工作方式及 DC/DC 变换器控制策略的不同分别作讨论。

### 2.1.1 交流侧短路电流的动态过程

不论处于何种工作状态, 三相短路后交流部分电路的变化与交流电网中的故障情况相同。以 A 相为例求解其短路电流, 设故障发生前变压器出口电压为  $u_{sa} = U_m \sin(\omega_s t + \varphi_0)$ , 可列回路方程为

$$R_{s1} i_{sa} + L_{s1} \frac{di_{sa}}{dt} = U_m \sin(\omega_s t + \varphi_0) \quad (1)$$

可求得 A 相短路电流  $i_{sa}$  的表达式为

$$i_{sa} = I_m \sin(\omega_s t + \varphi_0 - \varphi) + [I_{m|0|} \sin(\varphi_0 - \varphi_0) - I_m \sin(\varphi_0 - \varphi)] e^{-\frac{R_{s1} t}{L_{s1}}} \quad (2)$$

式中:  $\omega_s$  为电网频率;  $R_{s1}$ 、 $L_{s1}$  分别为短路后变压器出口至短路点的单相线路电阻、电感;  $I_{m|0|}$  为故障前电流峰值;  $\varphi_0$  为故障前电压电流相角;

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R_{s1}^2 + (\omega_s L_{s1})^2}}, \quad \varphi = \arctan \frac{\omega_s L_{s1}}{R_{s1}}.$$

### 2.1.2 直流侧短路电流的动态过程

图 3 为直流侧电路部分, 由于三相短路换流器交流侧端口电压过低, 无法正常工作, 其自身的低电压检测保护功能会迅速闭锁换流器的 IGBT, 下文中假设 IGBT 的闭锁均为故障瞬间闭锁。

充电状态下发生故障时, 稳压电容与后部分电路形成放电通路(如图 3 椭圆回路所示), DC/DC 变换器的充电控制策略一般为动力电池的输入恒电流控制方式, 故电容在调控下缓慢地向动力电池放电, 直至超出变换器调控范围放电截止。此过程中, 电

容电压有所降低, 直流电路不会出现过压过流现象。若通过通信, 控制 DC/DC 变换器与 AC/DC 换流器同步闭锁 IGBT, 则稳压电容不再向动力电池放电, 其电压维持不变, 电池相当于与电路断开。

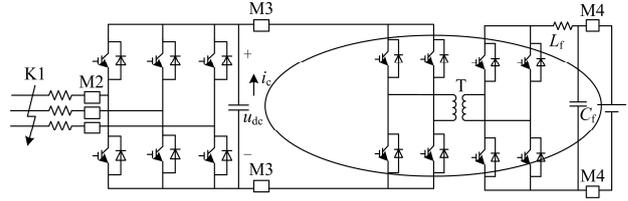


图 3 直流侧电路

Fig. 3 Circuit of DC side

放电模式下, 换流器闭锁后动力电池会通过 DC/DC 变换器继续向稳压电容恒流充电, 若不采取措施, 电容会出现过压过流现象, 因此, 有必要将 DC/DC 换流器与 AC/DC 换流器同时闭锁。若换流器闭锁失败, 动力电池会继续向短路点放电, 此时动力电池提供的短路电流与换流器的控制相关。

## 2.2 直流侧极间短路故障

直流侧在 k2 处发生两极间短路故障时用图 4 所示的等效电路图进行分析, 其中  $R_f$  为极间短路电阻,  $R_l$  为直直流线路电阻,  $L_l$  为直直流线路电感, 一般两变换器之间的线路较短,  $L_l$  很小, 可以忽略。由于 AC/DC 换流器直流端口处有大电容滤波, 故忽略线路的对地电容。极间短路后, 故障点电压极低, 电路可分为 AC/DC 换流器侧和 DC/DC 变换器侧两部分(分别如图 4 中左右两回路所示), 故障电流电压可表示为

$$\begin{cases} i_f = i_{dc1} + i_{dc2} \\ u_{dc} = i_{dc1}(R_l + R_f) + i_{dc2} R_f \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $i_f$  为极间短路电流;  $i_{dc1}$  为换流器侧提供的短路电流;  $i_{dc2}$  为直流变换器侧提供的短路电流;  $u_{dc}$  为稳压电容的电压; 下同。

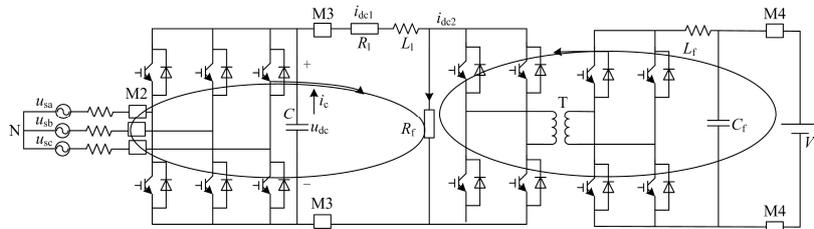


图 4 极间短路等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of inter-electrode short circuit

### 2.2.1 AC/DC 换流器侧短路电流动态过程

不论处于何种工作方式, 两极短路后, 通过 AC/DC 换流器的电流会急剧增大, 其 IGBT 在自身保护的作用下瞬间闭锁, 剩下与 IGBT 反并联的二极

管连接在电路中。交流回路故障动态过程可分为电容放电、二极管开始导通和不控整流稳态三个阶段。

故障初始, 换流器直流侧电容电压高于三相线电压, 二极管截止, 电容向短路点放电, 电路可等

效为电容的一阶放电回路(如图5所示), 此时  $i_{dc1}$  约等于电容放电电流  $i_c$ 。记故障前直流 AC/DC 换流器直流端口的电压电流值分别为  $U_0$ 、 $I_0$ , 由回路电流方程

$$RC \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = 0 \quad (4)$$

可求得  $u_{dc}$ 、 $i_c$  的值如式(5)、式(6)所示。

$$u_{dc} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (5)$$

$$i_c = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6)$$

式中:  $R$  为直流回路中的总电阻;  $C$  为稳压电容。

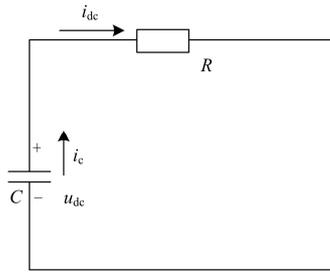


图5 电容放电电路

Fig. 5 Capacitor discharge circuit

该放电电路的时间常数  $\tau=RC$ (0.1~1 ms 级), 电容放电过程持续时间极短, 放电至  $u_{dc}$  低于三相线电压后, 二极管开始导通, 交流侧电源开始通过二极管向故障点馈入电流。二极管的导通依据不控整流桥的自然换向原则, 刚开始时六个二极管的导通时间并不均匀, 交流侧提供的短路电流为一个衰减振荡量, 经一段时间后趋于稳定, 故障进入三相不控整流稳定阶段, 其电路如图6所示。

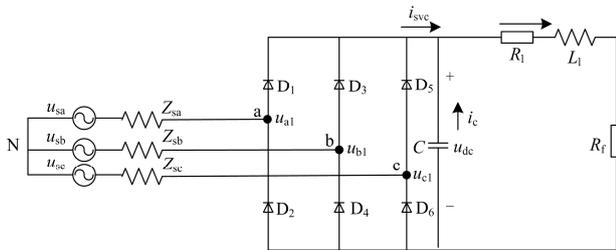


图6 不控整流电路图

Fig. 6 Circuit of three-phase uncontrolled rectifier

不控整流进入稳态后, 直流电容起稳压作用,  $u_{dc}$  的波动很小, 可以将其看作定值  $U_{dc}$ ,  $i_{dc1}$  约等于变换器输出电流  $i_{svc}$ 。忽略交流线路及滤波器的电阻, 由图6可得交流侧相电压和相电流的关系。

$$\dot{U}_{sa} = j\omega_s L_s \dot{I}_{sa} + \dot{U}_{aN} \quad (7)$$

可求得交流线路上相电流基频分量的有效值  $I_{sa}$  为

$$I_{sa} = \frac{\sqrt{U_{sa}^2 - U_{aN}^2}}{\omega_s L_s} \quad (8)$$

式中,  $L_s$  为交流线路电感。

定义单极性二值逻辑开关函数  $S_\phi$ , 不控整流稳态中, 各相的上下桥臂分别导通半个周期, 且 B 相、C 相分别滞后 A 相 1/3、2/3 个周期, 则有

$$\begin{cases} S_a = \begin{cases} 1, & kT \leq t \leq \frac{T}{2} + kT \\ 0, & \frac{T}{2} + k \leq t \leq (k+1)T \end{cases}, k \in N \\ S_b = S_a(t - \frac{T}{3}) \\ S_c = S_a(t + \frac{T}{3}) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $T$  为基频周期;  $S_a$ 、 $S_b$ 、 $S_c$  分别为 ABC 的开关函数。

设交流回路各相电流为

$$\begin{cases} i_{sa} = I_m \sin \omega t \\ i_{sb} = I_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{sc} = I_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (10)$$

换流器的输出电流  $i_{svc}$  可表示为

$$i_{svc} = S_a i_{sa} + S_b i_{sb} + S_c i_{sc} \quad (11)$$

将式(9)、式(10)代入式(11), 化简可得

$$i_{svc} = \frac{3}{\pi} I_m \quad (12)$$

电容 C 可将其看作是两个电容器串联, 其连接点为假想中点  $N'$ , 图7中 a、b、c 三点至  $N'$  的电压为

$$u_{\phi N'} = \begin{cases} \frac{U_{dc}}{2}, & S_\phi = 1 \\ -\frac{U_{dc}}{2}, & S_\phi = 0 \end{cases} \quad (13)$$

经推导可求得

$$u_{aN} = \frac{2U_{dc}}{\pi} (\sin \omega t + \sum_n \frac{1}{n} \sin n\omega t), n = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

其基频分量有效值为  $U_{aN1} = 0.45U_{dc}$ 。

当  $R_f$  较小时, 故障后  $U_{dc}$  也比较小, 故式(8)中忽略  $U_{aN}$ , 有

$$I_{sa} \approx \frac{U_{sa}}{\omega_s L_s} \text{ 且 } I_{sa} < \frac{U_{sa}}{\omega_s L_s} \quad (15)$$

$$i_{dc1} = i_{svc} \approx \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{U_{sa}}{\omega_s L_s} \quad (16)$$

由式(16)可粗略算得不控整流稳态时交流侧提供的短路电流。

### 2.2.2 DC/DC 变换器侧短路电流特性

直流侧电路的故障动态特性需按站内工作模式分别讨论。充电过程中发生故障时, DC/DC 变换器的高压侧输入电压电流骤降接近于零, 此时相当于 DC/DC 变换器将动力电池与短路点隔离,  $i_{dc2}=0$ 。

放电过程中, DC/DC 变换器的输入为动力电池, 一般电动汽车向电网放电选择恒流放电方式, 极间故障的发生不影响变换器的正常调控工作, 动力电池继续以参考电流  $I_{ref}$  放电, 如图 4 中右侧回路所示, 忽略电流的波动, 电池提供的短路电流平均值约为正常运行时直流线路上的电流, 即  $i_{dc2} \approx i_{dc0}$ 。

### 2.3 故障特征总结

交流侧线路三相短路后, 交流侧的状态和普通交流电网的短路情况一样, 短路点电压骤降, 短路电流激增。换流器交流侧端口电压过低, 换流器闭锁, 直流侧与故障点断开。充电时, 直流电容在 DC/DC 变换器的调控下缓慢向动力电池放电, 电容电压小幅下降; 放电时动力电池向电容充电, 电容电压电流逐渐增大, 存在危险。

直流侧极间短路时, 在 AC/DC 换流器瞬间闭锁的情况下, 直流线路上由于电容的快速放电, 电流激增, 稳压电容电压骤降(跌至几十伏), 随后 AC/DC 中二极管逐渐导通并进入不控整流稳定阶段, 此过程中换流器的二极管会承受很大的过电流。动力电池在放电运行方式下会提供短路电流, 但在 DC/DC 变换器的调控下不会出现过流及电流大幅升降的情况。

## 3 故障仿真验证

在仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 2 所示的充放电系统, AC/DC 和 DC/DC 变换器的类型和控制策略采用第 1 节中所述方式, 动力电池设置为恒定内阻, 端口电压  $V=f(SOC)$ 。

各元件参数设置: AC/DC 换流器 LC 滤波器滤波电容为  $13.1 \mu\text{F}$ , 滤波电感为  $0.86 \text{ mH}$ , 直流侧稳压电容为  $10 \text{ mF}$ , 换流器输出电压为  $800 \text{ V}$ ; 直流线路电阻为  $0.0139 \Omega/\text{km}$ , 长  $0.1 \text{ km}$ ; DC/DC 隔离变压器容量为  $0.5 \text{ MVA}$ , 变比为  $800 \text{ V}/400 \text{ V}$ ; DC/DC 滤波电容为  $0.01 \mu\text{F}$ , 滤波电感为  $0.01 \text{ H}$ ; 动力电池内阻为  $0.5083 \Omega$ , 额定电压为  $300 \text{ V}$ , 工作电压为  $270\sim 330 \text{ V}$ , 额定容量为  $60 \text{ Ah}$ 。

运行模式设置如下: 动力电池初始 SOC 设定为 0.5; 正常运行时, 分别选择 1C 电流恒流充放电。

### 3.1 交流侧三相短路故障仿真

仿真中  $1.5 \text{ s}$  时在图 2 的 k1 处(LC 滤波器入口)设置三相金属性短路故障, 短路电阻取  $0.001 \Omega$ , 故障瞬间换流器 IGBT 闭锁, 充放电过程中各电气量的变化曲线如图 7 所示。从图中可以看到交流侧短路点电压降为 0, 电网提供的电流  $I_{sa1}$  增大, 故障点右侧电流  $I_{sa}$  降为零; 充电时直流侧电容缓慢向动力电池放电, 动力电池端口电压电流缓慢减小, 直流侧无过流现象; 放电时 DC/DC 不闭锁情况下动力电池向电容充电, 电容电压攀升, 存在危险。

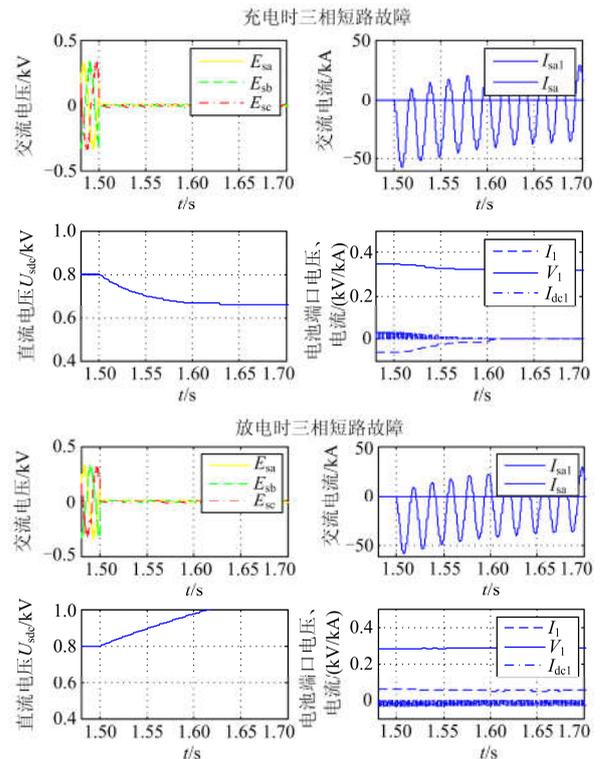


图 7 三相短路仿真结果

Fig. 7 Simulation results of three-phase short circuit

### 3.2 直流侧极间短路故障仿真

仿真中  $1.5 \text{ s}$  时在图 2 的 k2 处设置极间短路故障, 短路电阻  $R_f=0.1 \Omega$ , 故障瞬间换流器 IGBT 闭锁。由上文的分析可推导计算出充放电过程中电容放电阶段、不控整流稳定阶段各参量的值, 各参数计算值与仿真值如表 1 所示, 可看到计算值与仿真值基本吻合。仿真波形如图 8 所示, 可以看到换流器侧电路电容先快速向短路点放电, 接着换流器二极管逐渐导通, 交流侧向短路点提供短路电流, 经一段振荡后, 不控整流进入稳态; DC/DC 变换器侧电路充电时提供的短路电流为 0, 放电时在变换器的控制下向短路点提供正常工作时的电流, 但不会出现过流现象。

表 1 极间短路各参数理论与仿真值的比较

Table 1 Comparison between theoretical and simulation values of pole short circuit parameters

参量	计算值	仿真值
电容放电峰值/kA	7.89	7.78
$i_{dc1}/kA$	1.10	1.02
$i_{dc2}/kA$	0	0
$u_{dc}/kV$	0.11	0.102
交流侧电流 $I_{sa}/kA$	0.76	0.81
电容放电时间/ms	0.7	0.7
电容放电峰值/kA	7.89	7.76
$i_{dc1}/kA$	1.10	1.03
$i_{dc2}/kA$	0.03	0.03
$u_{dc}/kV$	0.11	0.106
交流侧电流 $I_{sa}/kA$	0.76	0.75
电容放电时间/ms	0.7	0.75

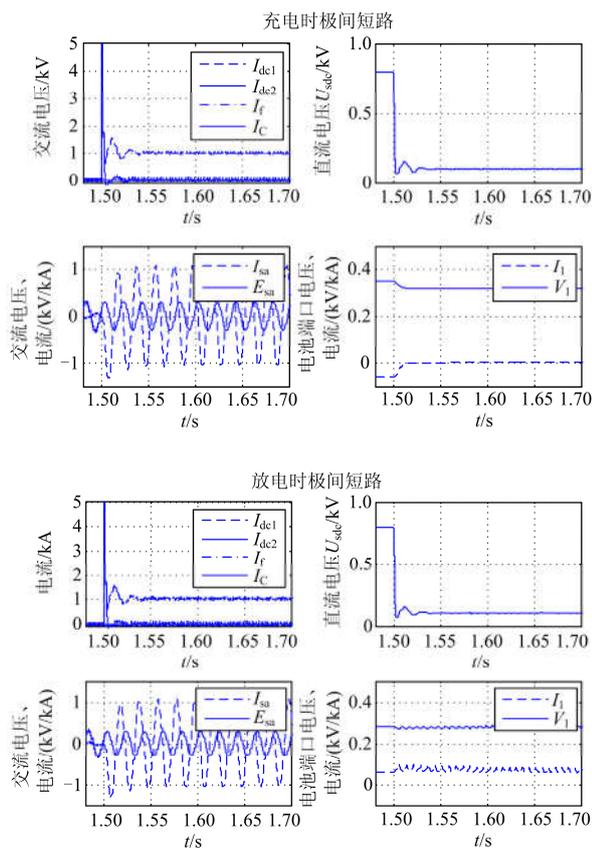


图 8 极间短路仿真结果

Fig. 8 Simulation results of pole short-circuit fault

## 4 充电站保护配置

传统交流电路的保护配置有过压、过流和距离保护等, 直流线路的故障隔离方法主要有直流线路配置直流断路器和利用 AC/DC 换流器交流侧的交

流断路器切除故障。本文针对图 2 所示充电站研究其保护配置方法, 分别在图 2 的 M1、M2、M3 处设置开关并配置保护, 相互配合以保障充电站的安全运行。

k1 处的三相短路故障应由开关 M1 切除, M1 处选择普通断路器, 配置过电流保护和低电压保护; 为避免换流器闭锁而 DC/DC 变换器仍向稳压电容过度充电的情况发生, 通过通信实现 AC/DC 换流器与 DC/DC 变换器的联动闭锁。同时 M2 处设置有高/低电压监测, 电压过高过低时能触发换流器闭锁。M1 动作的动作方程为

$$\begin{cases} I_{M1} > I_{set.1} \\ U_{M1} < U_{set.1} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $U_{M1}$ 、 $I_{M1}$  分别为 M1 处的测量电压、电流;  $I_{set.1}$ 、 $U_{set.1}$  分别为过流保护和低电压保护的整定值。

k2 处的极间短路故障选择由保护 M3 切除, 并通过 AC/DC 换流器与 DC/DC 变换器的联动闭锁断开放电状态中动力电池向短路点提供的短路电流。M3 的动作方程为

$$\begin{cases} I_{M3} > I_{set.3} \\ U_{M3} = U_{dc} < U_{set.3} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $U_{M3}$ 、 $I_{M3}$  为 M3 处的测量电压、电流值;  $I_{set.3}$ 、 $U_{set.3}$  分别为过流保护和低电压保护的整定值。

## 5 总结

电动汽车充电站内交流线路发生三相短路故障时, 故障点将电路分为交流和直流侧两部分, 交流部分故障特性同常规交流电路, 直流回路的动态过程与充放电工作方式相关, 放电过程发生短路较为危险, 但在换流器及 DC/DC 变换器的配合闭锁下可避免过流过压现象的出现。直流极间短路故障时, AC/DC 换流器侧的电路历经电容放电、二极管导通后进入不控整流稳态的过程, 其中电容大电流放电时间短, 保护难以识别, 稳态阶段可粗略求得直流电流、稳压电容电压值; DC/DC 变换器侧电路在不同工作方式中, 动力电池可能会向短路点输出电流, 但不会出现过流情况。对电动汽车充电站内的故障分析能够清晰地了解其故障发展过程, 有利于更好地实现站内保护配置与整定, 以保障充电站及电网的安全工作。

## 参考文献

- [1] 杜鹃. 迈过充电这道坎[N]. 人民日报, 2017-02-01(09).
- [2] 谢毓毓. 电动汽车直流快速充电站的故障分析与保护研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

- XIE Yuyu. Fault analysis and protection research on DC fast charging station of electric vehicle[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [3] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.
- MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.
- [4] 陈新琪, 李鹏, 胡文堂, 等. 电动汽车充电站对电网谐波的影响分析[J]. 中国电力, 2008, 41(9): 31-36.
- CHEN Xinqi, LI Peng, HU Wentang, et al. Analysis of impacts of electric vehicle charger on power grid harmonic[J]. Electric Power, 2008, 41(9): 31-36.
- [5] 周娟, 任国影, 魏琛, 等. 电动汽车交流充电桩谐波分析及谐波抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 18-25.
- ZHOU Juan, REN Guoying, WEI Chen, et al. Harmonic analysis of electric vehicle AC charging spot and research on harmonic restriction[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 18-25.
- [6] 艾圣芳, 林湘宁, 万云飞, 等. 考虑 V2G 模式的含多个电动汽车充电站有源配电网规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 122-129, 20.
- AI Shengfang, LIN Xiangning, WAN Yunfei, et al. Study of the active distribution network planning considering multiple electric vehicle charging stations participating in V2G applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 122-129, 20.
- [7] 刘志鹏, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车充电站的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 54-59.
- LIU Zhipeng, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 54-59.
- [8] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 201-207.
- ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A coordinated charging strategy for electric vehicle three-phase load balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 201-207.
- [9] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
- TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [10] 陈琛, 徐志根, 刘术波. 电动汽车充电站继电保护配置方案的研究[J]. 电气应用, 2012, 31(12): 64-65, 74.
- CHEN Chen, XU Zhigen, LIU Shubo. Research on relay protection scheme of electric vehicle charging station[J]. Electrotechnical Application, 2012, 31(12): 64-65, 74.
- [11] 郭煜华, 范春菊. 含大规模电动汽车的配电网保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 14-20.
- GUO Yuhua, FAN Chunju. Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 14-20.
- [12] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [13] 李梦琪. 电动汽车充电站直流供电技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- LI Mengqi. Research on DC power supply of electric vehicle charging station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [14] 胡竟竞, 高一波, 严玉婷, 等. 电压源换流器直流侧短路故障特性分析[J]. 机电工程, 2014, 31(4): 512-516, 544.
- HU Jingjing, GAO Yibo, YAN Yuting, et al. DC side short-circuit fault analysis of VSC[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2014, 31(4): 512-516, 544.
- [15] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
- LI Bin, HE Jiawei. DC fault Analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.

收稿日期: 2017-03-07

作者简介:

徐歌(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: 514639036@qq.com

肖仕武(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制、电力系统故障分析与继电保护。E-mail: xiaoshiwu@263.net

(编辑 魏小丽)