

含高比例分布式电源的直流配电系统故障 恢复过电压机理及其抑制

刘海金^{1, 2}, 靳鹤志², 王金浩¹, 王亮¹, 温伟杰², 李斌²

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030000; 2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:针对直流配电系统故障恢复过程中出现的过电压问题,文章研究了该过电压的产生机理及其抑制方法。介绍了典型直流配电系统的拓扑结构,给出两种核心换流装备(两电平 VSC 和 DC/DC 换流器)在双极短路故障下的电流及电压故障特征。基于故障点隔离后的健全区系统等效电路,研究了故障恢复过电压机理及影响因素,揭示了故障存续期间各换流器电压跌落速度不一致是导致故障恢复过电压的根本原因。在此基础上,以保障换流器电压跌落速度相同和直流断路器开断容量为约束,提出各换流器出口限流参数匹配设计原则,同时兼顾限制故障电流和抑制故障恢复过电压效果。在 PSCAD/EMTDC 进行了仿真验证。

关键词:两电平 VSC; DC/DC 换流器; 故障恢复过电压; 限流参数匹配设计

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2023.11.006

中图分类号:TM713

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2023)11-0045-08

Fault recovery overvoltage mechanism and its suppression in DC distribution system with high-proportion DG penetration

Liu Haijin^{1,2}, Jin Hezhi², Wang Jinhao¹, Wang Liang¹, Wen Weijie², Li Bin²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Taiyuan 030000, China.

2. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the overvoltage problem during fault recovery of DC distribution system, this paper studies the generation mechanism and suppression method of overvoltage. This paper first introduces the topology of typical DC distribution system and gives the current and voltage fault characteristics of two core converter equipments (two-level VSC and DC/DC converter) under bipolar short-circuit fault. Based on the equivalent circuit of the normal system after fault isolation, the generation mechanism and influencing factors of fault recovery overvoltage are analyzed. It is found that the root cause of fault recovery overvoltage is the inconsistent voltage drop rate of each converter during the fault. Then, on this basis, the matching design principle of the outlet current limiting of each converter is proposed to ensure the same voltage drop rate of the converter and the breaking capacity of the DC circuit breaker. The fault current limiting and fault recovery overvoltage are also taken into account. The simulation results of PSCAD/EMTDC show that the proposed method has good overvoltage suppression effect.

Keywords: two-level VSC, DC/DC converter, fault recovery overvoltage, current limiting parameter matching design

0 引言

目前,随着可再生能源通过分布式发电的方式以多点、分散的方式接入配电网,传统的交流配电网难以满足实际应用要求^[1],随着电源和负荷日趋直流化,直流配电系统可减少电能变换环节、提升系统运行效率、便于直流电源与负荷接入、无须考虑相角和频率问题,是智能配电技术的重要发展方向^[2-7]。

作为直流配电系统的核心设备,基于全控型电力电子器件的电压源型换流器可以根据交/直流转换功能的不同,进一步细分为基于两电平 VSC (voltage

source converter) 的 AC/DC 换流器和基于 buck-boost 电路的 DC/DC 换流器。各换流器的直流侧均配置一定的电容,正常工况下该电容可以吸收电流波动,起到稳定直流系统电压的作用;但故障工况下,该电容向故障点快速放电,故障电流上升快、幅值高且无自然过零点。考虑换流器中的电力电子器件抗浪涌能力差,故障电流与器件脆弱性之间存在尖锐矛盾,浪涌电流冲击对电力电子器件带来潜在威胁^[8]。

针对故障浪涌电流冲击问题,为降低直流断路器的动作速度、开断容量等技术要求^[9-10],不少学者围绕限流问题开展系列研究。文献[11-13]提出采用斩

波调制技术、并联型配电网无功补偿装置、旁路电感和串联电感等方式限制故障电流以防止设备损坏；文献[14-16]从柔性直流配电系统故障分析的角度，分析直流系统和交流系统故障暂态全过程以及不同故障位置、故障隔离方法下对直流配电网的影响，进而提出限流方案；文献[17-18]提出限流式直流断路器拓扑结构并验证在直流配电网中的限流作用；文献[19-21]基于改进换流器拓扑结构实现直流线路短路电流的有效抑制。

目前所提限流方案主要分为以下三种技术路线：在线路中装设限流装置；采用具备限流功能的直流断路器；改进换流器拓扑结构从电源侧降低故障回路的系统源电压等。从单一的故障回路考虑，以上技术方案对故障电流均有较好的效果，可以显著降低直流断路器的开断技术要求。然而，实际直流配电系统往往是多换流器并网系统，目前的研究往往只关心如何限制某个换流器的故障馈流，但未考虑不同换流器之间的配合问题。前期研究发现，当各换流器出口限流参数配置不合理时，各换流器支撑电容电压跌落速度不一致，故障点隔离后的系统恢复过程中各换流器经过线路电感、电容等杂散参数形成不可控的多阶振荡，伴随出现浪涌电流和显著过电压（最高可达 2 p.u.），对电力电子器件的安全、电缆线路的绝缘性能等造成严重威胁。

为了厘清故障隔离后系统恢复过程中的过电压产生机理并提出相应抑制措施，文中分析了直流配电系统中两电平 VSC 和 DC/DC 换流器故障特征，进一步通过等效电路揭示了故障隔离后各换流器之间的过电压产生机理及影响因素，提出基于限流参数匹配设计的过电压抑制方法，并在 PSCAD/EMTDC 中验证了该方法的有效性。

1 直流配电系统典型结构与故障特征

1.1 直流配电系统典型结构

典型直流配电系统拓扑结构如图 1 所示，主要包括配电台区、光伏和储能等分布式电源，本地负载等。其中，配电台区是与交流主网相连的配电变压器供电范围，具有天然的交流属性，必须经过 AC/DC 换流器并入低压直流系统。光伏、储能、直流负载等具有直流端口属性，可经 DC/DC 换流器并入低压直流系统。

实现交直流系统互联的电压源型 AC/DC 换流器主要包括两电平 VSC 和模块化多电平换流器 MMC 等。但在低压供电场景下，由于不受 IGBT 器件直串均压技术难题的限制，两电平 VSC 的器件少、成本低、可靠性高的优势凸显。而且，由于必须采用 PWM 调制来获得对称三相交流电压，MMC 不再具备损耗低的优势。为此，两电平 VSC 被认为在低压柔性直流供电系统中更具实用价值，其拓扑结构如图 2 所示。

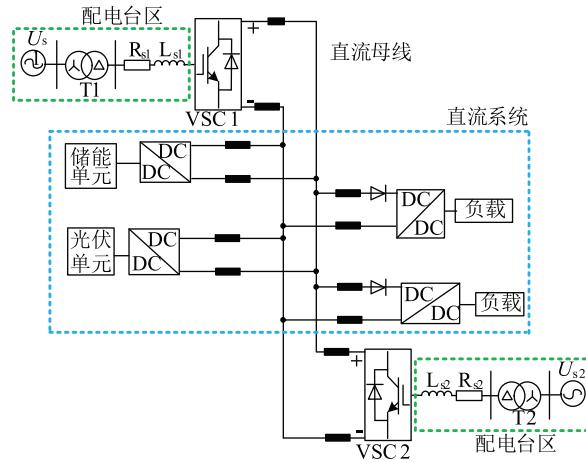


图 1 直流配电系统拓扑结构
Fig. 1 Topology of DC distribution system

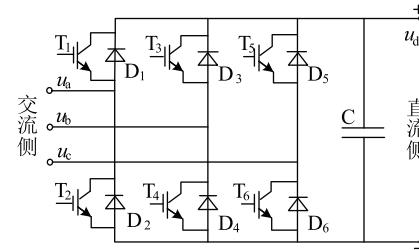


图 2 两电平 VSC 拓扑
Fig. 2 Topology of two-level VSC

两电平 VSC 包括三相六桥臂，每相由上、下两个桥臂组成，借助两组开关器件来控制桥臂的导通和关断，开关器件由 IGBT 和反并联的二极管组成，图中 IGBT 由 $T_1 \sim T_6$ 表示，续流二极管由 $D_1 \sim D_6$ 表示，在换流电路直连侧出口处，接有支撑电容 C，用于维持直流电压稳定。

实现高低压直流变换的 DC/DC 换流器主要包括隔离型和非隔离型两大类。其中，隔离型以输入串联输出并联的双有源桥 (ISOP-DAB) 及其变形为主；非隔离型以 Buck-Boost 电路及其变形为主。相比于 ISOP-DAB，Buck-Boost 电路仅需要 1/4 甚至更少的器件，在低压直流供电系统中具有很好的应用价值。需要说明，光伏用 DC/DC（低压侧流向高压侧）和直流负载用 DC/DC（高压侧流向低压侧）功率方向单一，其拓扑结构可进一步简化成单向功率型 DC/DC，如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

如图 3(a) 所示， C_L 和 C_H 分别为低压侧和高压侧支撑电容， G_1 为 IGBT， D_1 为二极管， L 为电感，当 G_1 导通时，低压侧电容 C_L 向电感 L 放电，将电场能量转变为磁场能量，当 G_1 关断后，电感电流向高压侧电容 C_H 充电，将磁场能量转变成电场能量，由此实现功率从低压侧向高压侧传递。同理，图 3(b) 所示的 DC/DC 换流器仅能实现功率从高压侧向低压侧传递，其中二极管 D 可避免高压侧线路故障时 DC/DC 换流器支撑电容对故障点放电。

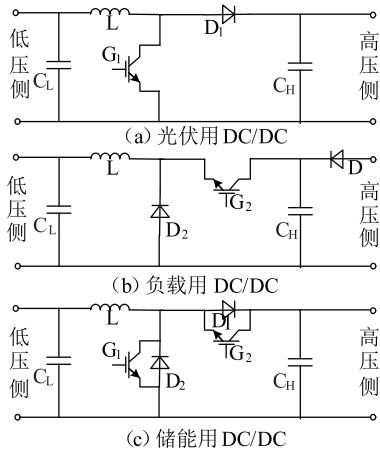


图 3 DC/DC 换流器拓扑

Fig. 3 Topology of DC/DC converter

储能电站在直流系统中起到平抑功率波动的作用,在电能过剩时,作为负载来吸收功率;在电能不足时,作为电源来释放功率。因此,储能并网用 DC/DC 必须具备双向功率流动需求,其拓扑结构如图 3(c) 所示,具有两种工作模式:Buck 降压模式和 Boost 升压模式。Buck 模式下,G₂、D₂ 处于工作状态;Boost 模式下,G₁、D₁ 处于工作状态;为了保证功率波动状态下的电压稳定,高低压侧电容均有容值限制。

1.2 故障电流及各端口电压特征

直流配电系统的直流故障包括双极短路故障、单极接地故障和断线故障,其中双极短路故障对系统影响最大,因此以双极短路故障为例分析换流器闭锁前的故障特征。图 3(b) 所示的负载用 DC/DC 集成了单向二极管,当高压侧直流系统故障时,二极管自动阻断高压侧支撑电容 C_H 向故障点的放电路径;C_H 和 C_L 中的能量可维持负载的短时运行。此时,C_H 中的电压跌落速度与故障回路无关,仅由支撑电容参数及负载水平决定。而对于两电平 VSC 和图 3(a) 和图 3(b) 所示的光伏及储能用 DC/DC,双极短路故障下,支撑电容均以故障回路作为放电路径,其放电速度与故障回路紧密相关。为此,本节重点分析换流器支撑电容放电阶段的暂态过程。

当线路上发生双极短路故障时,VSC 和 DC/DC 换流器支撑电容对故障点放电的等效电路均可简化为图 4,图中 L/2、R/2 分别为直流侧正负极出口到故障点线路的等值电感和等值电阻,由于直流线路的等值电容远小于换流器支撑电容,可忽略不计。

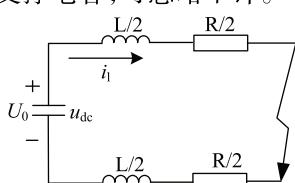


图 4 电容放电阶段等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of capacitor discharge stage

设故障发生前支撑电容初始电压为 U₀, 直流线路电流初始值为 I₀。双极短路故障发生后,换流器支撑电容 C 对故障点放电的动态过程可以表示为式(1),由于直流线路的等值电阻及故障电阻很小,其阻尼一般满足 R≤2(L/C)^{1/2},故支撑电容放电为二阶欠阻尼振荡过程,式(1)的特征根是一对共轭复数,如式(2)所示。

$$LC \frac{d^2 u_{dc}}{dt^2} + RC \frac{du_{dc}}{dt} + u_{dc} = 0 \quad (1)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{R}{2L} \pm j \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = -\sigma \pm j\omega' \quad (2)$$

式中 $\sigma = R/(2L)$; $\omega' = \sqrt{1/(LC) - [R/(2L)]^2}$ 。

根据初始条件可求得支撑电容 C 两端电压 u_{dc} 、放电电流 i_l 如式(3) 所示。

$$\begin{cases} u_{dc} = Ae^{-\sigma t} \cos(\omega' t + \theta) \\ i_l = A \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\sigma t} \sin(\omega' t + \theta - \beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} A = \sqrt{U_0^2 + \left(\frac{U_0\sigma}{\omega'} - \frac{I_0}{\omega'C}\right)^2} \\ \theta = -\arctan\left(\frac{U_0\sigma}{\omega'} - \frac{I_0}{\omega'C}\right) \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega'}{\sigma}\right) \end{cases}$$

由于直流线路的等值电阻及故障电阻较小,对于放电回路的电流电压影响较小,可忽略不计,式(3) 简化为:

$$\begin{cases} u_{dc} = \sqrt{U_0^2 + \frac{LI_0^2}{C}} \cos\left(\sqrt{\frac{1}{LC}}t + \arctan\left(\frac{I_0}{U_0}\sqrt{\frac{L}{C}}\right)\right) \\ i_l = C \frac{du_{dc}}{dt} = -\sqrt{U_0^2 + \frac{LI_0^2}{C}} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC}}t + \arctan\left(\frac{I_0}{U_0}\sqrt{\frac{L}{C}}\right)\right) \end{cases} \quad (4)$$

当系统正常运行时, $(I_0)^2 \ll (U_0)^2$, 可将式(4) 简化为:

$$\begin{cases} u_{dc} = U_0 \cos\left(\sqrt{\frac{1}{LC}}t\right) \\ i_l = C \frac{du_{dc}}{dt} = -U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC}}t\right) \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,由于线路电感值比较小,在发生双极短路故障时,支撑电容通过线路电感对故障点放电,故障电流 i_l 在短时间内快速上升,甚至当故障点在换流器出口处时,支撑电容直接对故障点放电,放电电流可达到数千安,直接威胁到系统的运行和器件的安全,因此通常采用在出口处串联电感的方法来限制短路故障电流。

$$\frac{du_{dc}}{dt} = -U_0 \sqrt{\frac{1}{LC}} \sin\left(\sqrt{\frac{1}{LC}}t\right) \quad (6)$$

由式(6)可知,电压跌落速度 du_{dc}/dt 与支撑电容初始电压 U_0 、支撑电容值 C 、放电回路电感 L 有关。 U_0 对于同一直流系统在偏差范围内保持一致;支撑电容 C 取决于换流器容量,一般按照 $20 \mu F/(kV \cdot A)$ 确定支撑电容值^[22];放电回路电感 L 由 VSC、DC/DC 换流器到故障点的距离以及回路中限流电感参数等决定。因此,各换流器电压跌落速度与故障点与各换流器的电气距离、换流器支撑电容决定。

2 直流故障恢复过电压产生机理及危害

2.1 故障恢复过电压产生机理及影响因素

由于各换流器到故障点的故障回路参数不同,如故障距离、回路电感电容等,各换流器支撑电容电压跌落速度不同。以两个换流器为例,假设换流器 1 的支撑电容 C_1 电压跌落至 U_{10} ,换流器 2 的支撑电容 C_2 电压跌落至 U_{20} ,在故障区被隔离后,其等效电路如图 5 所示。其中,L 为两个换流器间线路及电抗的等效电感。

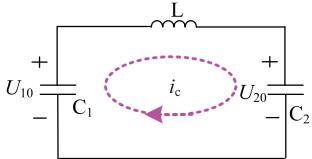


图 5 故障隔离后不同换流器间的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit between converters after fault isolation

在初始状态下,电容 C_1 上电荷量为 $Q_1 = C_1 U_{10}$,电容 C_2 上的电荷量为 $Q_2 = C_2 U_{20}$,电荷将从电荷量大的电容流向电荷量小的电容,即在两电容之间形成环流 i_c ,直至两电容电压相等。若 $U_{10} > U_{20}$,电容 C_1 将对 C_2 放电,基于拉普拉斯变换法可得 $t \geq 0$ 时的运算电路如图 6 所示。

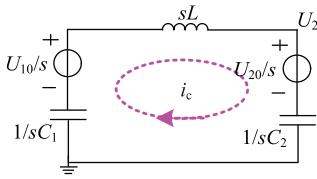


图 6 电容之间充放电过程运算电路

Fig. 6 Operational circuit of charging and discharging process between capacitors

支撑电容 C_2 电压相函数为:

$$U_2(s) = \frac{\frac{U_{20}}{s}C_2 + \frac{U_{10}}{s} - \frac{1}{sL + \frac{1}{sC_1}}}{\frac{1}{sL + \frac{1}{sC_1}} + sC_2} \quad (7)$$

通过拉氏反变换可得到电容 C_2 电压时域表达式为:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= U_{20}\varepsilon(t) + \frac{C_1(U_{10} - U_{20})}{C_1 + C_2}\varepsilon(t) - \\ &\quad \frac{C_1(U_{10} - U_{20})}{C_1 + C_2} \cos \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 L}} t \end{aligned} \quad (8)$$

支撑电容 C_2 两端电压的最大峰值为:

$$U_{2\text{峰值}} = U_{20} + \frac{2C_1(U_{10} - U_{20})}{C_1 + C_2} \quad (9)$$

由式(9)可知,支撑电容 C_1 对 C_2 充电过程中, C_2 两端电压在初始值 U_{20} 的基础上以幅值 $2C_1(U_{10} - U_{20})/(C_1 + C_2)$ 开始振荡。当 $\Delta U = U_{10} - U_{20} = 0$ 时,即故障存续期间各换流器电压跌落速度相同时,故障恢复过程中不会出现过电压;而当电压差 $\Delta U = U_{10} - U_{20}$ 过大(最大可达 1 p.u.), C_2 两端出现严重过电压,最高可到 2 p.u.。为此,故障存续期间各换流器电压跌落速度不一致是产生故障恢复过电压的根本原因。

由图 2、图 3 可知支撑电容与换流器内部的 IGBT、二极管等电力电子器件并联,该过电压同样施加在各电力电子器件上,可能导致器件击穿,且击穿后进一步引发电容的短路放电,随之产生的极高浪涌电流将产生更大的破坏力,造成器件不可恢复的热损坏。

2.2 仿真验证

为了验证上述理论分析,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 7 所示的直流配电系统,其中 VSC 额定容量为 630 kW,DC/DC 额定容量均为 100 kW,换流器支撑电容按 $20 \mu F/(kV \cdot A)$ 确定,其中 L_1, L_2 为换流器出口串联电感,起到限流作用, $K_1 \sim K_3$ 为直流断路器,分布式电源由直流电压源代替,元件参数和电气参数初始值如表 1 所示。

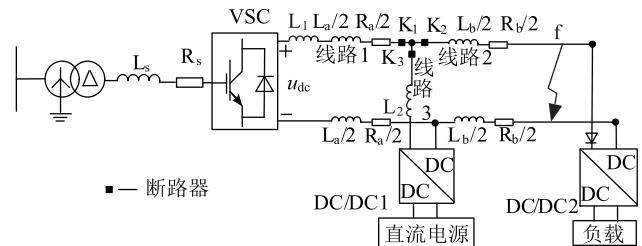


图 7 仿真模型拓扑结构

Fig. 7 Topology of simulation model

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

元件参数	初始值
$R_a = 0.006 \Omega$, $R_b = 0.004 \Omega$	$U_0 = 750 \text{ V (DC)}$
$L_a = 0.12 \text{ mH}$, $L_b = 0.08 \text{ mH}$	$I_0 = -156 \text{ A (DC)}$
$C_{VSC} = 12.6 \text{ mF}$	$U_g = 400 \text{ V (AC)}$
$C_{DC/DC} = 4 \text{ mF}$	$U_{\text{直流电源}} = 400 \text{ V}$

图 7 中换流器主要包括 VSC, 储能用 DC/DC1, 负载

用 DC/DC2。如 1.2 节所述,DC/DC2 出口集成单向二极管,其端口电压特性由负载决定;DC/DC1 和 VSC 的电压特性由故障回路参数决定。考虑换流器电压跌落速度不同是引发故障恢复过电压的根本原因,本节以故障发生在线路 2 上为例讨论健全区内 VSC 和 DC/DC1 相互作用下的故障恢复过电压。需要特别指出,故障区(线路 2 及 DC/DC2)在故障后 5 ms 被直流断路器 K_2 隔离^[23],不参与故障恢复过程,因此无须考虑 DC/DC2。

VSC 和 DC/DC1 的电压跌落速度由故障回路电感、支撑电容等参数决定。为了验证故障回路参数对各换流器电压跌落速度及故障恢复过电压的影响,本节设置仿真算例 1 为换流器出口不加任何限流装置;算例 2 为换流器出口加不同限流电感。

1) 算例 1: 换流器出口不加任何限流装置。

设置 $L_1 = L_2 = 0$, $t = 1.2$ s 时发生故障, 故障点位于线路 2 上。根据现有实际工程, 低压直流供电系统的供电范围较小, 线路较短为几百米, 该算例中故障点距离两电平 VSC 的电气距离由 $L_a + L_b$ (0.2 mH) 来反映; 而故障点距离 DC/DC1 的电气距离由 L_b (0.08 mH) 来反映, 故障电压、电流波形如图 8 所示。

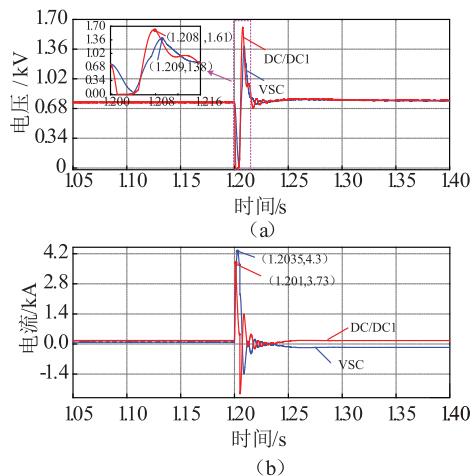


图 8 VSC、DC/DC1 出口未加限流装置

Fig. 8 VSC, DC/DC1 outlet without current-limiting device

由图 8 可知, 若在换流器出口处没有安装任何限流装置, 由于 VSC 和 DC/DC1 换流器距离故障点的距离不同, 电容放电回路中的电感值不同, 导致支撑电容电压跌落速度不同, VSC 支撑电容电压在故障发生后的 4 ms 跌落至最小值, 其放电电流可达 4.3 kA, DC/DC1 换流器在故障发生后的 1.3 ms 内支撑电容电压跌落至 0, 其放电电流可达 3.73 kA。由于放电回路中电感值很小, 故障电流在短时间内快速上升, 为抑制故障电流, 常在换流器出口串联限流电感限制故障电流。

在故障清除后, 由于支撑电容电压跌落至 0, 交流

电源和分布式电源(直流电源)分别对 VSC 和 DC/DC1 支撑电容进行充电, 由图 8(a)可知, 该过程中 DC/DC1 支撑电容过电压峰值为 1.61 kV, VSC 支撑电容过电压峰值为 1.38 kV。

2) 算例 2: 换流器出口串联不同限流电感。

由于各换流器电压跌落速度由故障回路参数等决定, 且由电压跌落速度不一致引起的支撑电容之间的电压差是故障恢复过电压的根本原因, 本算例忽略故障检测时间, 在 $t = 1.2$ s 故障发生时, 换流器出口投入限流电感 L_1, L_2 。

设置 VSC 和 DC/DC1 出口串联电感分别为 $L_1 = 2$ mH, $L_2 = 0.2$ mH, 此时 VSC 放电回路电感为 $L_1 + L_a + L_b$ (2.2 mH), DC/DC1 放电回路电感为 $L_2 + L_b$ (0.28 mH), 由于在该情况下回路电感差距较大, 各换流器支撑电容间电压差较大, 观察其故障恢复过电压情况, 如图 9 所示。

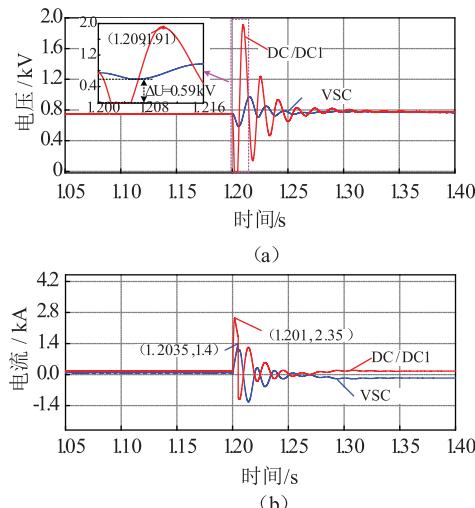


图 9 装设限流电感 $L_1 = 2$ mH, $L_2 = 0.2$ mH

Fig. 9 With current-limiting inductors

$$L_1 = 2 \text{ mH} \text{ and } L_2 = 0.2 \text{ mH}$$

设置参数为 $L_1 = 1$ mH, $L_2 = 1$ mH, 此时 VSC 放电回路电感为 $L_1 + L_a + L_b$ (1.2 mH), DC/DC1 放电回路电感为 $L_2 + L_b$ (1.08 mH), 在该情况下回路电感差减小, 各换流器支撑电容间电压差也有所减小, 观察故障恢复过电压变化情况, 如图 10 所示。

由图 9 可知, 在 $L_1 = 2$ mH, $L_2 = 0.2$ mH 情况下, $t = 1.205$ ms 故障清除时, 支撑电容间电压差 ΔU 为 0.59 kV, VSC 支撑电容对 DC/DC1 支撑电容放电, 使得 DC/DC1 支撑电容两端电压最大值为 1.91 kV (2.54 p.u.); 由图 10 可知, 在 $L_1 = 1$ mH, $L_2 = 1$ mH 情况下, 故障清除时, 支撑电容间电压差 ΔU 为 0.475 kV, DC/DC1 支撑电容两端电压最大值为 1.6 kV (2.13 p.u.)。故由支撑电容电压跌落速度不一致引起的电压差 ΔU 使得电容之间存在充放电过程, 引起电容两端的过电

压,且随着 ΔU 的减小可以被有效抑制。

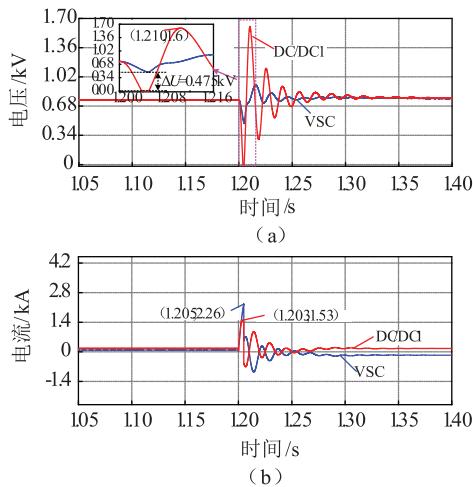


图 10 装设限流电感 $L_1 = 1 \text{ mH}$, $L_2 = 1 \text{ mH}$

Fig. 10 With current-limiting inductors

$$L_1 = 1 \text{ mH} \text{ and } L_2 = 1 \text{ mH}$$

3 基于限流参数匹配的故障恢复过电压抑制

3.1 固态限流器及其电感参数匹配原则

为抑制故障恢复过电压,提出图 11 所示的限流器拓扑结构,其由 IGBT 及其反并联二极管、RC 缓冲支路、限流电感 L 和避雷器 MOV 组成。

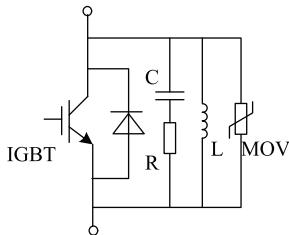


图 11 限流器拓扑

Fig. 11 Topology of current limiter

正常运行时,IGBT 导通,限流器运行在低损耗模式;检测到过流信息后,IGBT 关断,电流先由 IGBT 转移至 RC 缓冲支路,再转移至限流电感支路,限流器运行在限流模式。

作为限流器的核心元件,限流电感的参数设计需要考虑以下两个条件:限流电感能够保障各换流器支撑电容电压跌落速度一致,从而有效抑制故障恢复过电压;限流电感能够将故障电流限制在直流断路器的开断范围内,从而保障故障的可靠隔离。

1) 以抑制故障恢复过电压为目标的参数匹配原则。

由上文可知,为抑制故障恢复过电压,各换流器支撑电容电压跌落速度应保持一致。根据换流器支撑电容电压跌落速度表达式(6)可知,各换流器支撑电容电压初始值均为 U_0 , $K = LC$ 是决定换流器支撑电容电压

跌落速度的特征参数。只要保证 K 值相同,则各换流器支撑电容电压跌落速度必然相同。

为了验证该结论,本节以($C = 9 \text{ mF}$, $L = 10 \text{ mH}$)、($C = 15 \text{ mF}$, $L = 6 \text{ mH}$)、($C = 30 \text{ mF}$, $L = 3 \text{ mH}$)等三组参数为例,计算得到其电容电压跌落波形如图 12 所示,由此可见,换流器 K 值确实是决定其电压跌落速度的特征参数。

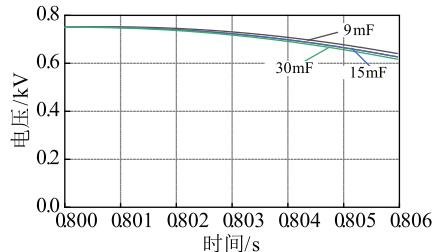


图 12 电感匹配下电容放电波形

Fig. 12 Capacitor discharge waveform with inductance matching

为了满足该约束条件以抑制故障恢复过电压,各换流器支撑电容应先由换流器容量确定,再以 K 相同为原则,确定各换流器出口的限流电感的比例关系。

2) 以故障电流为约束的电感参数设计。

由 2.2 节算例 1 可知,当换流器出口不加任何限流装置时,各换流器支撑电容对故障点快速放电,故障点电流可达 8 kA 甚至更大,超过直流断路器的开断能力。为此,限流电感参数的设计需以直流断路器的可靠开断为目标。具体以图 7 所示系统为例,假设直流断路器最大开断电流为 5 kA,那么各换流器出口限流电感需要将故障线路中的总故障电流抑制到 5 kA 以下。

如前所述,换流器支撑电容 C 与其容量成正比。满足各换流器 K 值相同的参数匹配原则,各换流器出口限流电感与其容量成反比,这意味着各换流器支撑电容的故障馈流与其容量成正比。具体而言,对于 VSC 容量与 DC/DC1 容量分别为 630 kW 和 100 kW 的情况而言,VSC 和 DC/DC1 支撑电容比值为 6.3:1;其限流电感比值为 1:6.3;其故障馈流比值为 6.3:1。根据该比例关系及故障电流最大值为 5 kA 的约束,确定 VSC 和 DC/DC1 的故障馈流最大值分别为 4.31 kA 和 0.69 kA。以直流断路器在故障发生后 5 ms 开断电流为约束,进一步根据故障馈流上升率 $di/dt = U_0/L$ ($U_0 = 750 \text{ V}$) 确定 VSC、DC/DC1 出口限流电感的最小值分别为 0.87 mH、5.43 mH。

因此,对于限流电感参数的设计,第一步是以抑制故障恢复过电压为目标,确定各换流器特征参数 $K = LC$ 相同的参数匹配原则;第二步是根据各换流器的故障馈流比例关系及直流断路器的最大开断能力为约束,确定限流电感的具体参数。

3.2 仿真验证

将 3.1 节提出的限流器装设至 PSCAD 中搭建的直流配电系统,如图 13 所示。根据电感参数匹配设计原则,将参数设置为 $C_1 = 12.6 \text{ mF}$, $L_1 = 2 \text{ mH}$, $C_2 = 4 \text{ mF}$, $L_2 = 6.3 \text{ mH}$, 可知该参数满足 $C_1 L_1 = C_2 L_2$, MOV 额定电压选择为 1 kV, $C = 5 \mu\text{F}$, $R = 0.25 \Omega$ 。 $t = 1.2 \text{ s}$ 时发生故障,故障点位于线路 2 上,故障区(线路 2 及 DC/DC2)在故障后 5 ms 被直流断路器 K_2 隔离^[20],不参与故障恢复过程,因此只需考虑 VSC 和 DC/DC1,仿真波形如图 14 所示。

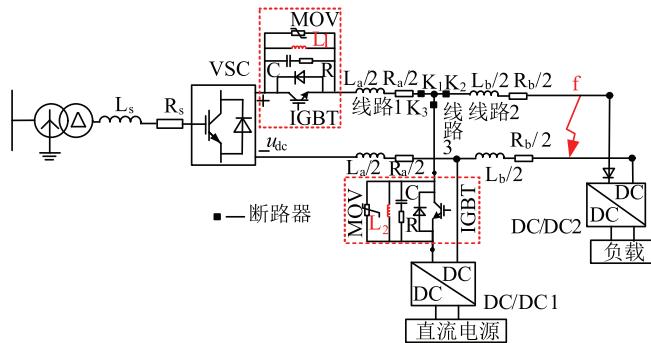


图 13 装设限流器的直流配电系统拓扑

Fig. 13 Topology of DC distribution system with current limiter

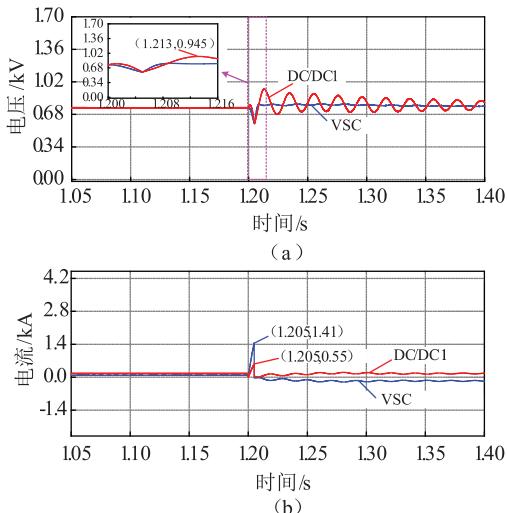


图 14 限流参数匹配下的电压电流波形

Fig. 14 Voltage and current waveform under current limiting parameter matching

由图 14(a) 可知,在 VSC 和 DC/DC1 换流器出口装设电感参数匹配的限流器后,其支撑电容电压在故障清除前跌落速度近似,导致在 $t = 1.205 \text{ s}$ 故障清除时刻,VSC 和 DC/DC1 换流器支撑电容电压接近,避免了支撑电容之间由电压差引起的充放电过程造成低电压电容两端产生过电压,此时故障清除后电压振荡峰值为 0.945 kV(1.26 p.u.),相比未装设电感参数匹配的限

流器情况下过电压幅值降低 50%,有效抑制了过电压。

4 结束语

文章通过分析直流配电系统中两种核心换流设备(两电平 VSC 和 DC/DC 换流器)在双极短路故障下的电压电流故障特征,揭示了直流故障恢复过电压产生机理及其影响因素,提出基于限流电感参数匹配设计的过电压抑制方法。研究表明,文中所提出的方法能够有效抑制故障恢复过程中由电压偏差引起的过电压,比未采用该方法的过电压幅值降低 50%,有利于提高系统恢复的可靠性。

参 考 文 献

- [1] 宋强,赵彪,刘文华,等.智能直流配电网研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(25): 9-19.
Song Qiang, Zhao Biao, Liu Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [2] Yang Jin, Fletcher J E, O' Reilly J, et al. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-Based dc network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [3] Stark M R, Tolbert L M, Ozpineci B. AC vs DC distribution: a loss comparison[C]//2008 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. Bogota, Colombia: IEEE, 2008: 1-7.
- [4] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29): 5051-5062.
Xu Zheng, Xue Yinglin, Zhang Zheren. Prospect on VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [5] 全少理,郭勇,杨卓,等.基于灵敏度分析的交直流配电网无功补偿策略[J].电力科学与技术学报,2021,36(5): 104-112.
Quan Shaoli, Guo Yong, Yang Zhuo, et al. Reactive power compensation strategy for AC/DC hybrid distribution network based on the sensitivity analysis [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 104-112.
- [6] 陈瑞洁,袁旭峰,李雨龙,等.基于双端有源阻尼的直流配电网稳定性提升技术研究[J].智慧电力,2021,49(11): 73-80.
Chen Ruijie, Yuan Xufeng, Li Yulong, et al. Improvement in Stability of DC Distribution Network Based on Double-terminal Active Damping [J]. Smart Power, 2021, 49(11): 73-80.
- [7] 耿世平,余敏,郭晓鹏,等.基于柔性变电站的交直流配电技术经济评估[J].电力科学与技术学报,2022,37(1): 140-150.
Geng Shiping, Yu Min, Guo Xiaopeng, et al. Technical and economic evaluation of AC and DC distribution based on flexible substation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 140-150.
- [8] Yang J, Fletcher J E, O' Reilly J. Short-Circuit and ground fault analyses and location in VSC-Based DC network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [9] 姬煜轲,赵成勇,李承昱,等.含新能源接入的柔性直流电网启动策略及仿真[J].电力系统自动化,2017,41(4): 98-104.
Ji Yuke, Zhao Chengyong, Li Chengyu, et al. Start-up strategy and simulation of flexible DC grid with renewable energy source [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 98-104.
- [10] 李承昱,李帅,赵成勇,等.适用于直流电网的限流混合式直流断路器[J].中国电机工程学报,2017,37(24): 7154-7162, 7429.

- Li Chengyu, Li Shuai, Zhao Chengyong, et al. A novel topology of current-limiting hybrid DC circuit breaker for DC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24) : 7154-7162, 7429.
- [11] Chunlian Jin, Roger Dougal. Current limiting technique based protection strategy of an industrial DC system [C]// International Symposium on Industrial Electronics. Canada: IEEE, 2006: 820-825.
- [12] 曹尚, 常鲜戎, 王辉云. D-STATCOM 实时同比例限流保护的研究 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(8) : 42-46.
- Cao Shang, Chang Xianrong, Wang Huiyun. Research of real-time current-limiting protection with the same proportion for D-STATCOM [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(8) : 42-46.
- [13] 汤伟, 杨铖, 刘洋, 等. 串联补偿型故障电流限制器应用研究 [J]. 电测与仪表, 2017, 54(22) : 88-92.
- Tang Wei, Yang Cheng, Liu Yang, et al. Application research of series compensation fault current limiter [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(22) : 88-92.
- [14] 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.
- [15] Tang Lianxiang, Boon-TeckOoi. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC system [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2007, 22(3) : 1877-1884.
- [16] 康保林, 高亮, 屈子程. 基于 MMC 的直流电网故障分析和保护方案研究 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(13) : 130-136.
- Kang Baolin, Gao Liang, Qu Zicheng. Research on DC faults analysis and protection scheme of DC power grid based on MMC [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13) : 130-136.
- [17] 江道灼, 张驰, 郑欢, 等. 一种限流式混合直流断路器方案 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4) : 65-71.
- Jiang Daozhuo, Zhang Chi, Zheng Huan, et al. A scheme for current-limiting hybrid DC circuit breaker [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4) : 65-71.
- [18] Xu J, Feng M, Zhao C. Modularreciprocating HVDC circuit breaker with current-limiting and bi-directional series-parallel branch switching capability [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(4) : 778-786.
- [19] 刘剑, 郁能灵, 范春菊, 等. 多端 VSC-HVDC 直流线路故障限流及限流特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19) : 5122-5133, 5393.
- Liu Jian, Tai Nengling, Fan Chunju, et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19) : 5122-5133, 5393.
- [20] 邢超, 奚鑫泽, 何鑫, 等. 多端直流输电系统中限流电抗器配置研究 [J]. 电测与仪表, 2023, 60(5) : 72-78.
- Xing Chao, Xi Xinze, He Xin, et al. Research on configuration of current limiting reactor in multi-terminal HVDC system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5) : 72-78.
- [21] 魏兴杰, 张英敏, 刘坤, 等. 半桥型 MMC 直流侧故障限流组合控制策略 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(1) : 209-217.
- Wei Xingjie, Zhang Yingmin, Liu Kun, et al. Combined control strategy of half-bridge MMC DC side fault current limiting [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1) : 209-217.
- [22] 栗向鑫, 韩俊飞, 梁倍华, 等. 面向单相微电网的双模式并联逆变器协调控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16) : 130-136.
- Li Xiangxin, Han Junfei, Liang Beihua, et al. Coordinated control method for dual-mode parallel converters in single-phase microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16) : 130-136.
- [23] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1) : 18-30.
- Zhu Tong, Yu Zhanqing, Zeng Rong, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1) : 18-30.

作者简介:



刘海金(1990—),男,博士,博士后,研究方向为直流输配电网继电保护。Email:lhj9239@163.com

靳鹤志(1999—),女,硕士研究生,研究方向为直流电网保护技术。
王金浩(1975—),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电压无功分析和新能源并网。
王亮(1989—),男,硕士,高级工程师,研究方向为交直流系统控制与保护。
温伟杰(1989—),女,通信作者,博士,副教授,研究方向为直流开断与直流系统故障穿越。Email:weijie.wen@tju.edu.cn
李斌(1976—),男,博士,教授,研究方向为电力系统保护与控制。

收稿日期:2023-06-13;修回日期:2023-09-04
(田春雨 编发)