

# 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析

唐溢, 李保宏, 曾蕊, 江琴, 刘天琪

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**交流系统短路后,柔性直流可等效为具有一定幅值和相位的电流源。文中基于受端电网发生故障时的柔性直流等效模型,分别对影响柔性直流等效电流源相位、幅值的相关因素进行了分析。柔性直流等效电流源的相位主要受故障类型影响,而幅值主要受控制方式、限幅环节以及电气距离影响,且不同情况的相互组合对交流系统短路电流的影响更加复杂。研究表明,对于交流侧三相短路故障,柔性直流对短路电流的影响共有馈入为零、馈入为有功控制环节限幅值、馈入为无功控制环节限幅值和馈入为无功控制环节参考值4种情况。最后通过基于PSCAD的仿真结果验证了相关分析的正确性。

**关键词:**模块化多电平换流器(MMC);柔性直流输电;控制策略;三相短路;短路电流;故障分析

**中图分类号:**TM713

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)01-0040-08

## 0 引言

近年来,随着广域交流大电网的形成,稳定性降低、短路电流超标等技术问题涌现,导致电网安全隐患争议不断<sup>[1-5]</sup>。与此同时,大功率电力电子器件、高压换流技术等发展迅速,其中柔性直流(下文简称“柔直”)输电凭借可实现异步互联、故障隔离、有功无功快速可控和无换相失败等优势有效应对了当前交流输电面临的困境,成为业界焦点<sup>[6-9]</sup>。目前直流工程投运规模显著提升,柔直对交流系统短路电流的影响也不断加深<sup>[10-12]</sup>。

针对柔直对交流侧故障的影响和三相短路电流的计算,国内外学者进行了大量研究<sup>[13-18]</sup>。文献[15]对含逆变型分布式电源的配电网故障分析进行探讨;文献[18]分析得到柔直电网换流站近区发生三相短路故障后,柔直提供的短路电流的特征,但对其影响因素分析得不够全面;文献[19]分析了柔直提供的短路电流的特性和机理,提出了含柔直输电系统的交直流混联系统短路电流分析和计算方法,但并没有指出柔直提供的短路电流与出口电压相位相关。现有研究结论仅初步明确了柔直提供的短路电流由总限幅环节决定,但实际上柔直对交流系统短路电流的影响因素较为复杂,特定情况下其无功限幅环节将成为决定因素。

为进一步厘清柔直对交流系统短路电流的影响因素,文中从交流系统发生三相短路故障时的柔直处理方法入手,基于相关研究成果,将柔直等效为具有一定相位与幅值的电流源,并重点针对相位

与幅值分析相关影响因素,包括控制方式、控制参考值、接地类型、电气距离等。结果表明,对于交流侧三相短路故障,柔直对短路电流的影响共有馈入为零、馈入为有功控制环节限幅值、馈入为无功控制环节限幅值和馈入为无功控制环节参考值4种情况。

## 1 三相短路故障时柔直处理方法

典型的柔直控制系统如图1所示。其中 $U_{dc}$ ,  $U_{dref}$ 分别为直流电压实际值和参考值; $P, P_{ref}$ 分别为有功功率实际值和参考值; $Q, Q_{ref}$ 分别为无功功率实际值和参考值; $U_{ac}, U_{acref}$ 分别为交流电压实际值和参考值; $i_d, i_{dref}$ 分别为 $d$ 轴电流实际值和参考值; $i_q, i_{qref}$ 分别为 $q$ 轴电流实际值和参考值。外环功率控制器通过矢量控制将控制量解耦并转换成内环电流参考值;内环电流控制器通过调节模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)上、下桥臂的差模电压保证交流侧电流能快速追踪参考电流,并最终与参考电流一致,实现对换流站功率或电压等电气量的控制。

根据外环控制器的控制方式不同,换流站存在4种组合控制方式,分别为定直流电压/定交流电压控制、定直流电压/定无功功率控制、定有功功率/定交流电压控制和定有功功率/定无功功率控制。

当换流器控制方式、有功或无功类参数的参考值以及柔直出口电压相位一定时,柔直对外提供的电流一定。因此相对于交流系统而言,发生三相短路故障后,柔直可视为大小可控的电流源。

$$i_{dref} = K_p(P_{ref} - P) + K_i \int (P_{ref} - P) dt \quad i_{dref} < i_{dlim} \quad (1)$$

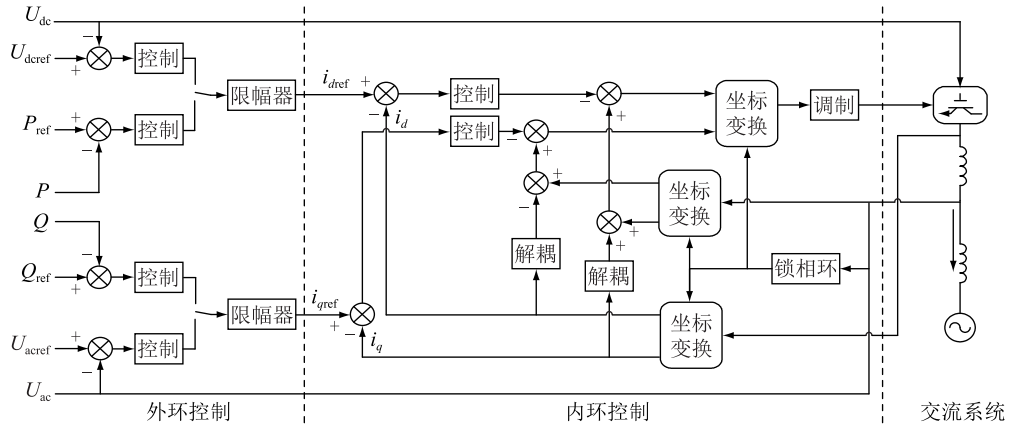


图1 基于矢量控制的柔直控制系统

Fig.1 VSC control system based on vector control

式中： $i_{dlim}$ 为 $d$ 轴电流限幅值，即1.1 p.u.； $K_p$ 、 $K_i$ 分别为比例系数和积分系数。

以有功功率控制模式为例，系统正常运行时，换流器输出电流为额定值，相当于幅值为1 p.u.的电流源。当柔直出口，即公共连接点(point of common coupling, PCC)处发生三相经电阻接地短路故障后，其外送功率 $P$ 受阻，瞬间下降到0，但此时其有功功率参考值 $P_{ref}$ 不变。由式(1)与图1可知，有功电流将持续上升，并最终稳定在限幅值1.1 p.u.<sup>[10]</sup>，且柔直出口电压与系统交流短路电流同相位，即有功电流与短路电流同相位，柔直提供的有功电流可全部馈入交流系统短路电流。因此柔直在进行短路电流计算时可以等效为具有一定相位与幅值的电流源。

## 2 柔直对交流侧短路电流的影响

柔直对交流电网短路电流的影响在于发生故障后，柔直输出到故障点的短路电流将叠加至交流系统短路电流上。一般情况下，交流系统短路电流为感性无功电流，相位接近 $-90^\circ$ 。考虑到柔直等效电流源的相位、幅值是由控制方式、故障类型等因素决定的，与交流系统短路电流可能具有不同的相位，因此在分析时不仅要考虑幅值，也须考虑两者相位。

### 2.1 等效电流源相位的影响因素

交流系统短路电流远大于柔直输出到故障点的短路电流，所以柔直对交流系统短路电流的影响只取决于电流源相位与短路电流相位一致的部分，与短路电流相位垂直的部分可以忽略。

柔直等效电流源的相位以其出口电压为参考，分为有功电流相位与无功电流相位，有功电流相位与出口电压相位一致，无功电流相位与出口电压相

位呈 $-90^\circ$ 相位差，如图2所示。因此，当不同类型故障导致换流器出口电压相位不同时，柔直输出电流相位也会发生变化，导致其与交流系统短路电流相加后的结果不同，最终使得柔直等效电流源具有不同幅值。

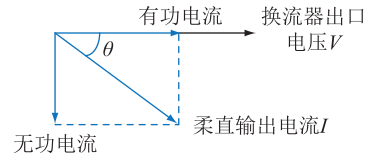


图2 柔直输出电流与其出口电压相位关系

Fig.2 Phase relation between VSC output current and its output voltage

#### 2.1.1 金属性接地故障

图3为柔直系统发生近区金属性故障示意。其中 $\dot{V}_1$ 为参考电压； $\dot{V}_2$ 为换流站出口电压； $I_{VSC2}$ 为柔直输出到故障点的短路电流； $I_{fault}$ 为交流系统短路电流；VSC为电压源换流站。

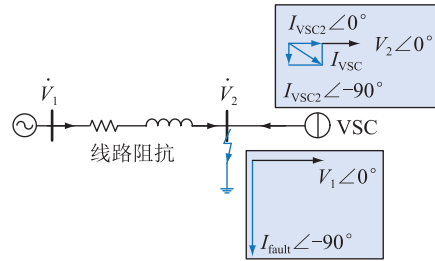


图3 柔直近区金属性短路故障

Fig.3 Metal short circuit fault near VSC

$$\delta V_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{V_2} \quad (2)$$

式中： $X$ 为线路等值电抗； $R$ 为线路等值电阻； $P_2$ 为线路末端有功功率； $Q_2$ 为线路末端无功功率； $\delta V_2$ 为出口电压横分量降落量。由式(2)可知，发生金属性短路时， $P_2$ 与 $Q_2$ 均为0，因此换流器出口处电压

$V_2$ 与参考电压  $V_1$  相位一致且接近于  $0$ 。此时柔直以相位为  $0$  输出功率, 馈入系统的短路电流主要由无功电流决定。无功电流相位与交流系统短路电流相位一致, 而有功电流相位与交流系统短路电流垂直, 基本不对交流系统短路电流产生影响。因此, 当柔直系统发生近区金属性故障时, 决定等效电流源幅值的是柔直系统中的无功控制环节。

### 2.1.2 经电阻接地故障

柔直系统近区发生经电阻接地故障的示意如图 4 所示。

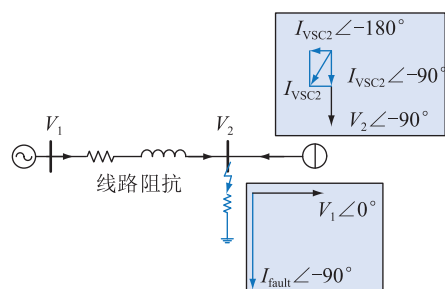


图 4 柔直近区经电阻短路故障

Fig.4 Short circuit fault by resistance near VSC

根据式(2)可知, 由于存在接地电阻, 此时  $P_2$  不为  $0$ , 同时由于接地点线路电压幅值  $V_2$  接近于  $0$ ,  $\delta V_2$  将非常大, 因此故障点电压  $V_2$  的相位与参考电压  $V_1$  相位差距较大, 接近于  $90^\circ$ 。此时柔直以相位约为  $90^\circ$  的出口电压  $V_2$  为参考输出功率, 导致柔直有功电流相位与交流系统短路电流相位一致。因此, 当柔直近区经电阻接地时, 决定等效电流源幅值的是柔直系统中的有功控制环节。

## 2.2 等效电流源幅值的影响因素

在柔直等效电流源的相位确定时, 不同的控制策略以及故障点的位置均会影响等效电流源的幅值, 因此须分析这 2 种因素对等效电流源幅值的影响机理。

### 2.2.1 定直流电压/定无功功率控制

定直流电压/定无功功率控制的数学模型如下:

$$i_{dref} = K_p(U_{dref} - U_{dc}) + K_i \int (U_{dref} - U_{dc}) dt$$

$$i_{dref} < i_{dlim} \quad (3)$$

$$i_{qref} = K_p(Q_{ref} - Q) + K_i \int (Q_{ref} - Q) dt \quad i_{qref} < i_{qlim} \quad (4)$$

式中:  $i_{dlim} = 1.1 \text{ p.u.}$ ,  $i_{qlim} = 0.5 \text{ p.u.}$ ;  $i_{qlim}$  为  $q$  轴电流限幅值。

PCC 发生三相短路故障后, 直流电压迅速升高, 根据式(3)可知参考电流  $i_{dref}$  将持续上升, 但受外环电流限幅环节影响, 参考电流会保持为限幅

值, 定电压端的有功功率传输能力无法达到额定状态, 剩余有功功率将向桥臂电容充电, 导致直流电压继续上升, 即定电压控制环节失稳。

当定无功功率参考值  $Q_{ref}$  设定为  $0$  时,  $q$  轴无功电流在故障时仍然跟随参考值保持为  $0$ , 柔直输出到故障点的短路电流仅为有功电流值。由于柔直以出口处电压相位为参考点输出短路电流, 因此系统在近区发生三相金属性短路故障时, 其输出有功电流相位与出口处电压相位一致, 为  $0^\circ$ , 但交流系统短路电流相位为  $-90^\circ$  且数值远大于有功电流, 因此该情况下柔直向短路点馈入的电流为  $0$ , 短路电流仅由交流系统决定; 当定无功功率参考值设定不为  $0$  时,  $q$  轴无功电流在故障时将增加到其外环无功控制环节的限幅值, 并且无功电流相位与交流系统短路电流相位一致, 此时柔直输出到故障点的短路电流为无功电流限幅值。

### 2.2.2 定有功功率/定交流电压控制

定有功功率/定交流电压控制的数学模型如下:

$$i_{qref} = K_p(U_{acref} - U_{ac}) + K_i \int (U_{acref} - U_{ac}) dt \quad i_{qref} < i_{qlim} \quad (5)$$

式中:  $i_{qlim} = 0.5 \text{ p.u.}$

PCC 发生三相短路故障后, 交流电压迅速降低为  $0$ , 无功电流参考值将迅速增加到限幅值。而定有功功率控制与定无功功率控制方式类似, 即有功功率参考值为  $0$ , 近区三相接地时, 其  $d$  轴有功电流仍为  $0$ , 若有功参考值不为  $0$ , 则故障时  $d$  轴有功电流将达到  $d$  轴限幅值。根据前述分析, 由于只有无功电流相位与交流系统短路电流相位一致, 因此柔直输出到故障点的短路电流为无功电流限幅值。

以上分析过程同样适用于定直流电压/定交流电压控制和定有功功率/定无功功率控制, 文中不再赘述。

### 2.2.3 电气距离

交流系统某支路发生三相短路故障时, 其等效电路如图 5 所示<sup>[19]</sup>。其中  $G_1, G_2$  分别为发电机 1、发电机 2;  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_{vsc}$  分别为线路 1、线路 2、线路 3 和换流站的等效阻抗。换流站呈现出的是电流源特性, 因此在短路电流计算中可将换流站等效为图 6 所示电流源, 其中,  $I_{VSC}$  为柔直输出电流;  $I_{VSC1}, I_{VSC2}$  分别为流经线路 1 和线路 2 的短路电流。

柔直等效成电流源后,  $Z_{vsc}$  不影响短路电流的分流, 柔直输出到故障点的短路电流  $I_{VSC2}$  计算如下:

$$I_{VSC2} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} I_{VSC} \quad (6)$$

故障点电气距离越远, 即  $Z_2$  越大, 柔直输出到



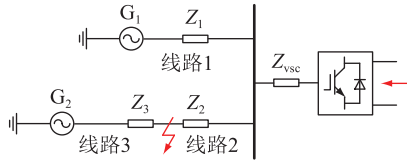


图5 短路故障等值电路

Fig.5 Equivalent circuit diagram of short circuit fault

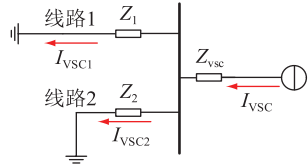


图6 短路电流计算等值电路

Fig.6 Equivalent circuit diagram of short circuit current calculation

故障点的短路电流幅值越小。最终的故障点短路电流由计算所得的柔直输出到故障点的短路电流与交流侧短路电流相加得出。

### 2.3 柔直对交流系统短路电流的影响规律

由前文可知,对于三相短路故障,柔直对短路电流的影响由换流站所采取的控制策略、故障类型、电气距离和控制参数共同决定,具体见表1。

由表1可知,从受端短路电流超标计算的角度出发,保守计算时可将柔直输出到故障点的短路电流按照最大值1.1 p.u.进行折算,大多数故障情况下柔直主要由无功控制限幅决定。因此,一般情况下将柔直的无功控制环节设置为定无功功率控制,并将参考值设置为0,即可不对外提供短路电流。

## 3 仿真实验

在PSCAD上搭建如图7所示的柔直系统,相关参数主要采用PSCAD发布的标准模型,系统运行参数与控制参数如表2所示。

### 3.1 不同控制方式仿真

#### 3.1.1 定直流电压/定无功功率控制

(1) 换流器 $d$ 轴有功电流 $i_d$ 变化情况。当柔直采取定直流电压/定无功功率控制时,其外环控制框图如图1所示,输出的 $d$ 轴有功参考电流 $i_{dref}$ 的表达式如式(3)所示,仿真结果见图8。

换流器近区发生三相短路故障后,交流电压迅速降低,MMC有功功率传输能力降低为0。然而,在故障发生瞬间,系统中的定功率端对功率传输仍然具有支撑作用,直流线路上此时依旧输送额定的有功功率,而受端定直流电压换流站由于交流系统电压降低,导致功率输送受阻,会有剩余功率不能被定电压换流站接受,这部分功率将会对桥臂子模块电容充电,从而导致直流电压不断上升,进一步作用于定电压控制环节,使 $d$ 轴参考电流随之上升。但受外环电流限幅环节的影响,该 $d$ 轴参考电流将稳定于限幅值,此后即使直流电压继续上升,其幅值仍将保持为限幅值1.1 p.u.不变。最终,由于电流幅值被限制,定电压端的有功功率传输能力无法达到额定状态,剩余有功功率将继续向桥臂电容充电,导致直流电压继续上升,直至定电压控制环节失稳。

表1 柔直系统对三相短路电流的影响规律

Table 1 Influence of VSC on three phase short circuit current

交流侧故障类型	直流侧影响因素			等效电流源幅值/p.u.	对交流短路电流影响
	决定故障电流大小的环节	控制方式	控制参考值		
近区故障	金属性接地	无功控制环节	定交流电压	$U_{acref} = 500 \text{ kV}$	0.5
			定无功功率	$Q_{ref} > 0$	0.5
	经电阻接地	有功控制环节	定无功功率	$Q_{ref} = 0$	0
			定直流电压	$U_{dref} = 400 \text{ kV}$	1.1
远区故障	金属性接地	无功控制环节	定有功功率	$P_{ref} > 0$	1.1
			定有功功率	$P_{ref} = 0$	0
	经电阻接地	有功控制环节	定交流电压	$U_{acref} = 500 \text{ kV}$	0.5
			定无功功率	$Q_{ref} > 0$ 且故障影响较小	定无功功率参考值
金属性接地	无功控制环节	定无功功率	$Q_{ref} > 0$ 且故障影响较大	0.5	
		定无功功率	$Q_{ref} = 0$	0	

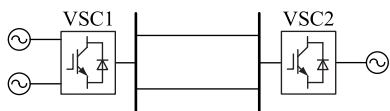


图7 柔直输电系统模型示意  
Fig.7 Schematic diagram of VSC-HVDC system model

表2 两端柔直输电系统参数

Table 2 Parameters of two terminal VSC-HVDC transmission system

参数	VSC1	VSC2
额定容量/MW	400	400
额定直流电压/kV	404	404
MMC 有功限幅/p.u.	1.1	1.1
MMC 无功限幅/p.u.	0.5	0.5
MMC 限幅优先级	有功优先	有功优先

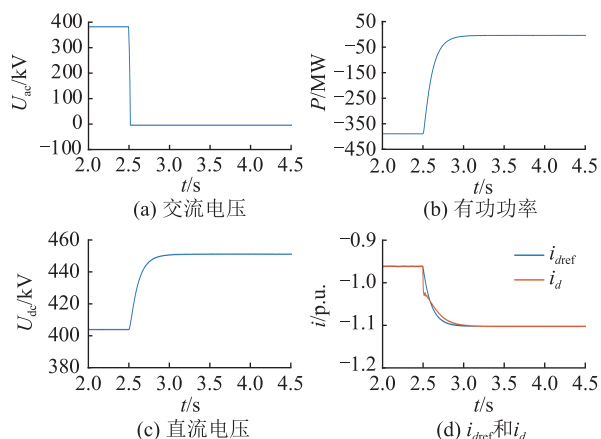


图8 定直流电压/定无功功率控制仿真结果

Fig.8 Simulation results of constant DC voltage/constant reactive power control

(2) 换流器  $q$  轴无功电流  $i_q$  变化情况。当柔直采取定无功功率控制时,其外环控制框图如图 1 所示,输出的  $q$  轴无功参考电流  $i_{qref}$  的表达式如式(4)所示。当换流器近区发生三相短路故障后,定无功控制下无功电流的变化须考虑无功功率参考值。

定无功功率参考值设定为 0 时, $q$  轴无功电流在故障时仍跟随参考值保持为 0。柔直输出到故障点的短路电流由有功电流与无功电流共同决定。如图 9 所示,虽然柔直端口电流有效值增加到 1.1 p.u.的限幅值,但其全部为有功电流,其相位与交流系统短路电流相位相差  $90^\circ$ 。因此,此时柔直输出到故障点的短路电流对短路电流基本无影响。

定无功功率参考值设定不为 0 时, $q$  轴无功电流在故障时将增加至限幅值,仿真模型中设定为 0.5 p.u.。此时无功电流相位与交流系统相位一致,据前述结论,柔直输出到故障点的短路电流为无功电流限幅值 0.5 p.u.,如图 10 所示。

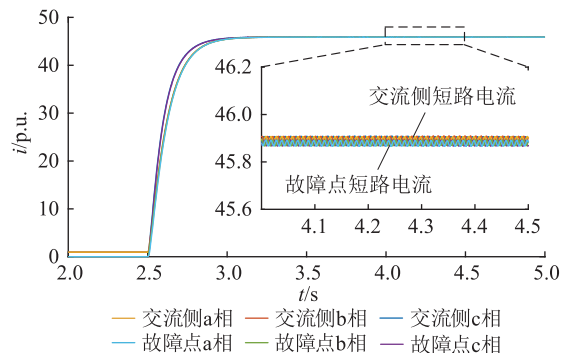


图9 交流侧和故障点短路电流 ( $Q_{ref}=0$ )

Fig.9 Short circuit current at AC side and fault point ( $Q_{ref}=0$ )

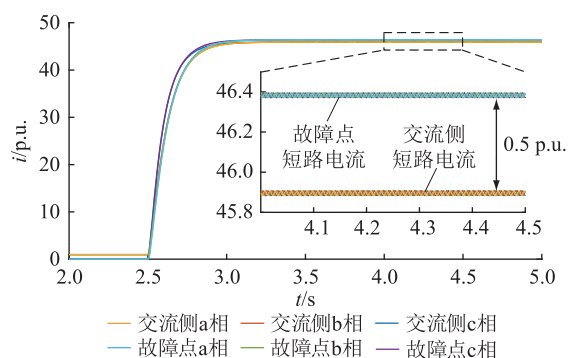


图10 交流侧和故障点短路电流 ( $Q_{ref} \neq 0$ )

Fig.10 Short circuit current at AC side and fault point ( $Q_{ref} \neq 0$ )

### 3.1.2 定直流电压/定交流电压控制

当采用定直流电压/定交流电压控制时,定直流电压控制方式导致的  $d$  轴有功电流变化情况与前述内容相同,此处仅需讨论定交流电压控制导致的  $q$  轴无功电流变化情况。当柔直外环无功控制采取定交流电压控制时,其外环控制框图如图 1 所示,输出的  $q$  轴无功参考电流  $i_{qref}$  的表达式如式(5)所示。

换流器近区发生三相短路故障后,交流电压迅速降低,即  $U_{ac}$  接近为 0,根据式(5)可知,外环无功控制环节的输出无功电流参考值  $i_{qref}$  将迅速增加直至达到限幅值 0.5 p.u.。由于在定直流电压/定交流电压控制下,柔直有功电流和无功电流均会增加至限幅值,而根据前述分析结论,只有无功电流才会影响三相接地故障电流,因此柔直输出到故障点的短路电流为 0.5 p.u.,具体如图 11 所示。

### 3.1.3 定有功功率/定无功功率控制

当采用定有功功率/定无功功率控制时,定无功功率控制方式导致的  $q$  轴无功电流变化情况与前述内容相同,此处仅讨论定有功功率控制方式导致的  $d$  轴有功电流变化情况。当柔直外环有功控制采取定有功功率控制方式时,其外环控制框图见图 1,输出的  $d$  轴有功参考电流  $i_{dref}$  的表达式如式(1)所示。

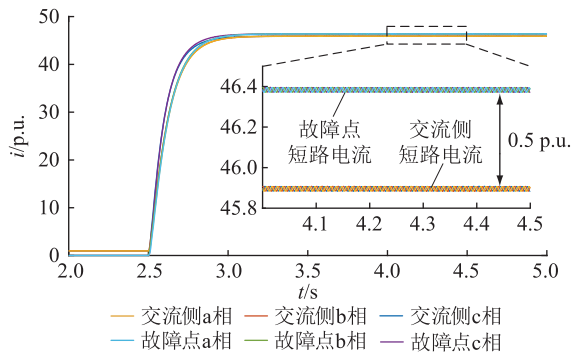


图 11 交流侧和故障点短路电流  
(定直流电压/定交流电压)

Fig.11 Short circuit current at AC side and fault point  
(constant DC voltage/constant AC voltage)

与定无功功率控制方式类似,定有功功率控制方式对  $d$  轴有功电流的影响也受参考值的影响,即当有功功率参考值为 0 时,近区三相接地时其  $d$  轴有功电流仍然为 0,当有功参考值不为 0 时,则故障时将达到  $d$  轴限值。

有功电流的变化基本不影响柔直输出到故障点的短路电流(经电阻接地故障除外),因此柔直输出到故障点的短路电流由无功功率控制环节决定。图 12 为交流侧和故障点短路电流,可知,在定无功功率为 0 时,有功电流不影响故障点短路电流大小。

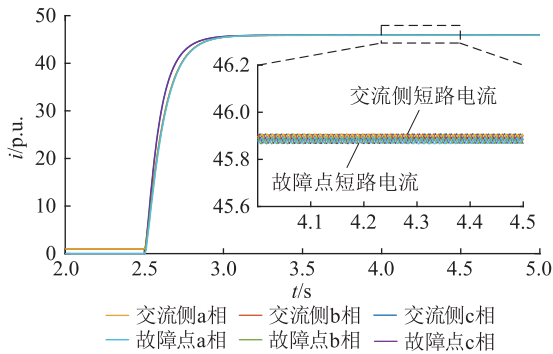


图 12 交流侧和故障点短路电流  
(定有功功率/定无功功率)

Fig.12 Short circuit current at AC side and fault point  
(constant active power/constant reactive power)

### 3.1.4 定有功功率/定交流电压控制

根据前述分析,在定交流电压控制下,柔直输出到故障点的短路电流为其无功电流控制环节的限幅值,与有功功率控制方式无关,定有功功率/定交流电压控制下系统的仿真情况如图 13 所示,可以发现,尽管有功电流被限幅,但柔直输出到故障点的短路电流值仍然为 0.5 p.u.,即为其无功电流幅值大小,仿真结果与分析一致。

### 3.2 不同故障类型仿真

柔直近区发生经电阻接地故障时,出口处短路

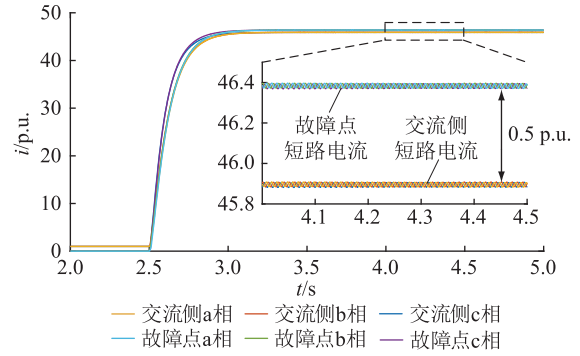


图 13 交流侧和故障点短路电流  
(定有功功率/定交流电压)

Fig.13 Short circuit current at AC side and fault point  
(constant active power/constant AC voltage)

点的电压相位为  $-90^\circ$ ,与交流系统短路电流的相位一致,且柔直输出的有功电流与出口电压相位相同,经前文分析,柔直输出的有功电流可全部馈入到短路点,其大小跟控制方式有关。当柔直采用定直流电压控制,或定有功功率控制(有功功率参考值不为 0)时,柔直输出到故障点的有功电流为限幅值 1.1 p.u.,当采用有功参考值为 0 的定有功功率控制模式时,换流站不对外贡献短路电流。系统运行在定直流电压/定无功功率控制(无功功率参考值为 0)时发生经电阻接地故障的仿真情况如图 14 所示,与理论分析一致。

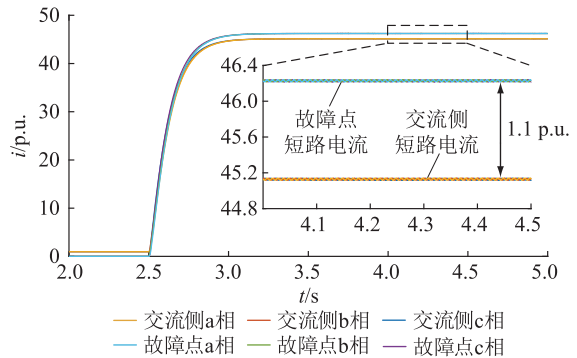


图 14 交流侧和故障点短路电流  
(定直流电压/定无功功率)

Fig.13 Short circuit current at AC side and fault point  
(constant DC voltage/constant reactive power)

### 3.3 不同电气距离仿真

图 15 为受端电网等效模型。为研究电气距离对柔直输出到故障点的短路电流的影响,仿真时通过改变图 15 中与  $Z_2$  相关的电气距离  $L$  来进行分析,其中  $I_{G1\_theory}$ ,  $I_{G1}$  分别为  $G_1$  提供的理论和实际短路电流; $I_{left}$ ,  $I_{right}$ ,  $I_{fault}$  分别为故障点到  $G_2$ 、换流站和到地的短路电流。

据图 15 中的变量关系所示,柔直在减少线路 2 的馈入短路电流  $I_{VSC2}$  的同时,会增加流经线路 1 的

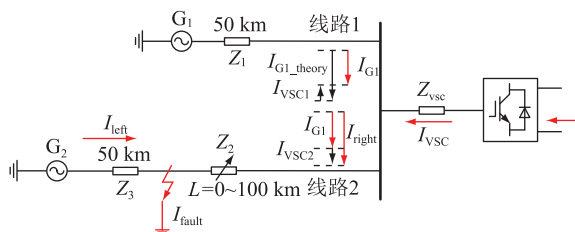


图 15 受端电网等效模型

Fig.15 Equivalent model of receiving end power grid

短路电流  $I_{VSC1}$ , 仿真时可通过改变柔性直流的控制策略以及电气距离来对比交流系统相关电流的变化情况进行验证。

据前文分析,当系统采用定有功功率/定无功功率控制且无功功率参考值为 0 时(方式 1),发生交流故障后,柔直不对外贡献短路电流;当系统采用定有功功率/定交流电压控制且无功功率参考值不为 0 时(方式 2),柔直仅对外提供无功电流。通过在同一电气距离下比较方式 1 与方式 2 下故障电流以及比较方式 1 与方式 2 下线路 1 的电流间的差值,则可得出柔直对外贡献的故障电流。

表 3 为不同控制方式下不同电气距离对短路电流的影响。由表 3 可知,随着故障点到柔直电气距离的增加,柔直馈入线路 2 的短路电流由 0.5 p.u.减小至 0.2 p.u.,流经线路 1 的短路电流由 0 增至 0.3 p.u.,与理论分析结果相符。

表 3 不同电气距离对短路电流的影响  
Table 3 Influence of different electrical distances on short circuit current

$L_2/km$	方式 1 理论值/p.u.		方式 1 测量值/p.u.	
	$I_{VSC1}$	$I_{VSC2}$	$I_{G1}$	$I_{fault}$
0	0	0	22.950	45.900
75	0	0	9.175	32.175
$L_2/km$	方式 2 理论值/p.u.		方式 2 测量值/p.u.	
	$I_{VSC1}$	$I_{VSC2}$	$I_{G1}$	$I_{fault}$
0	0	0.5	22.950	46.400
75	0.3	0.2	8.875	32.375

#### 4 结论

文中研究了发生三相短路时的柔直处理方法,分析了各柔直馈入交流系统的故障电流的影响因素,利用仿真进行了对比验证,结论如下:

(1) 当受端电网发生三相短路故障后,柔直会提供短路电流,并呈现电流源特性。

(2) 柔直馈入交流系统的短路电流与换流站控制方式、控制参数、交流侧故障类型和故障点电气距离有关,共有馈入为零、馈入为有功控制环节限幅值、馈入为无功控制环节限幅值和馈入为无功控

制环节参考值 4 种情况。

(3) 实际工程中,在保守计算柔直输出到故障点的短路电流时,可以按照电流限幅值进行折算。

(4) 大多数故障情况下柔直输出到故障点的短路电流主要由无功控制限幅决定,因此,一般情况下将柔直的无功控制环节设置为定无功功率控制,并将参考值设置为 0,即可不对外提供短路电流。

#### 参考文献:

[1] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):82-87.  
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.

[2] 孔明,汤广福,贺之渊. 子模块混合型 MMC-HVDC 直流故障穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(30):5343-5351.  
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan. A DC fault ride-through strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5343-5351.

[3] FARSHAD M. Ultra-high-speed non-unit non-differential protection scheme for buses of MMC-HVDC grids[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(9): 1541-1549.

[4] VIDAL-ALBALATE R, SOTO-SANCHEZ D, BELENGUER E, et al. Sizing and short-circuit capability of a transformerless HVDC DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2363-2377.

[5] JIA H P, YIN J Y, WEI T Z, et al. Short-circuit fault current calculation method for the multi-terminal DC grid considering the DC circuit breaker[J]. Energies, 2020, 13(6): 1347.

[6] 张浩,王先为,马焕,等. 基于 MMC 的直流电网短路电流分析及保护策略[J]. 智慧电力,2019,47(2):93-100.  
ZHANG Hao, WANG Xianwei, MA Huan, et al. Short circuit current analysis in DC grid and its protection strategy based on modular multilevel converter[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 93-100.

[7] JING Y R, LI R, XU L, et al. Enhanced AC voltage and frequency control of offshore MMC station for wind farm connection[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(15): 1771-1777.

[8] WANG Z H, LIU J, XIAO Z, et al. Modular multi-level converter based on arm transfer to clear dc fault[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(22): 5042-5047.

[9] 董云龙,包海龙,田杰,等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化,2011,35(19):89-92.  
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.

[10] 李英彪,李轶群,秦善萌,等. 柔性直流输电换流站输出短路电流水平机理分析[J]. 全球能源互联网,2019,2(6):



- 581-588.
- LI Yingbiao, LI Yiqun, QIN Shanmeng, et al. Study on the effect of VSC-HVDC on converter output short circuit current level[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6):581-588.
- [11] YU Y J, CHENG X Z, ZHANG C, et al. MMC-HVDC system oscillation suppression control strategy based on state feedback decoupling control[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(11).
- [12] GAO S L, YE H, LIU Y T. Accurate and efficient estimation of short-circuit current for MTDC grids considering MMC control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1541-1552.
- [13] 陈宁, 齐磊, 崔翔, 等. 柔性直流电网单极接地短路电流计算方法[J]. 电力建设, 2019, 40(4):119-127.
- CHEN Ning, QI Lei, CUI Xiang, et al. Calculation method for line-to-ground short-circuit currents of VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4):119-127.
- [14] 鲁裕婷, 赵天乐, 都洪基. 风电场经 VSC-HVDC 并网故障穿越协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3):30-35.
- LU Yuting, ZHAO Tianle, DU Hongji. A coordination control strategy of integrated wind farm low voltage ride-through based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3):30-35.
- [15] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):57-66.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):57-66.
- [16] 王威儒, 贺之渊, 李国庆, 等. 含交流影响的 MMC-HVDC 直流故障电流递推计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(51):313-320.
- WANG Weiru, HE Zhiyuan, LI Guoqing, et al. Recursive calculation method of MMC-HVDC DC fault current with AC effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(51):313-320.
- [17] 马越, 陈星莺, 余昆, 等. 不同类型短路故障下双馈风机短路电流分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2):60-65.
- MA Yue, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Analysis for short circuit current of DFIG-based wind generation system under different types of short circuit[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2):60-65.
- [18] 卜广全, 李英彪, 王姗姗, 等. MMC 对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21):6303-6312.
- BU Guangquan, LI Yingbiao, WANG Shanshan, et al. Analysis of the short-circuit current of MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21):6303-6312.
- [19] 易杨, 沈豫, 林章岁. 柔性直流输电系统贡献交流短路电流的特性分析及计算方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7):2150-2158.
- YI Yang, SHEN Yu, LIN Zhangsui. Characteristics and analysis methods of AC short-circuit current contributed by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7):2150-2158.

#### 作者简介:



唐溢

唐溢(1998),男,硕士在读,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制等(E-mail: tangyiseiscu@163.com);

李保宏(1986),男,博士,副教授,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制等;

曾蕊(1997),女,硕士在读,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制等。

## Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system

TANG Yi, LI Baohong, ZENG Rui, JIANG Qin, LIU Tianqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** After the AC system is short-circuited, voltage source converter-high voltage direct current (VSC-HVDC) can be equivalent to a current source with a certain amplitude and phase. In this paper, based on the equivalent model of VSC-HVDC when the receiving end grid fault occurs, the factors affecting the phase and amplitude of equivalent current source of VSC-HVDC are analyzed respectively. Studies show that the phase of the equivalent current source is mainly affected by the type of fault, and the amplitude is mainly affected by the control method, the amplitude limiter and the electrical distance. Because of the combination of different situations, the influence on the AC system short-circuit current is becoming more complicated. The research results show that for AC side three-phase short-circuit fault, the influence of VSC-HVDC on short-circuit current can be divided into four situations, which contain zero feed in, limited amplitude of active control link, limited amplitude of reactive power control link and reference value of reactive power control link. The simulation results based on PSCAD software verify the relevant analysis.

**Keywords:** modular multilevel converter; voltage source converter-high voltage direct current (VSC-HVDC); control strategy; three phase short circuit; influencing factors; fault analysis

(编辑 方晶)