

# 向无源网络供电的 LCC-MMC 混合直流输电系统控制策略

许 烽<sup>1,2</sup>, 宣晓华<sup>1</sup>, 陆 翌<sup>1</sup>, 裘 鹏<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>3</sup>, 虞海泓<sup>1</sup>, 江道灼<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江省杭州市 310014; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027;

3. 国网浙江省电力公司湖州供电公司, 浙江省湖州市 313000)

**摘要:** 电网换相换流器和模块化多电平换流器(LCC-MMC)混合直流输电系统兼顾了两种换流器的技术优势和经济优势,具有较好的应用前景。无源网络装设容性滤波装置能够起到平滑交流电压波形、提供电压支撑等作用。首先通过理论推导,建立了含容性滤波装置的模块化多电平换流器数学模型,基于  $dq$  理论,提出了模块化多电平换流器的无源解耦控制策略。针对送端电网换相换流器侧交流故障可能导致的功率中断等问题,从电网换相换流器和模块化多电平换流器的控制机理出发,分析了故障阶段及故障后的系统响应特性,并进而提出了送端交流故障穿越附加控制策略。为验证上述控制策略的有效性,在 PSCAD/EMTDC 内建立了一个 LCC-MMC 混合直流输电模型。通过受端电压频率变化和送端交流故障仿真,验证了所提控制策略的可行性和有效性。

**关键词:** 混合直流; 电网换相换流器; 模块化多电平换流器; 解耦控制策略; 交流故障穿越

## 0 引言

中国拥有近  $3 \times 10^6 \text{ km}^2$  的海域与 32 000 km 长的海岸线,面积达  $500 \text{ m}^2$  以上的岛屿达 6 900 多个。随着国际经济形势的转变和“一带一路”战略思想的提出,发展海洋经济势在必行,相应的电力设施亦需配套提升。然而,目前大多数岛屿依然以柴油机发电为主,噪音大、环境污染严重、供电可靠性和持续性差,不能满足海岛未来用电需求。因此,如何实现海岛高可靠性、高稳定性供电,减少不必要停电时间是一个亟须解决的重要问题。

随着电压源换流器(voltage source converter, VSC)高压直流输电技术,尤其是模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术的快速发展,以及高电压等级直流海缆研发制造水平的提高,结合电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和 MMC 技术的混合直流输电技术<sup>[1-2]</sup>为离岸岛屿供电提供了一种全新的直流供电方式。它具有制造成本低、运行方式灵活、可向无源网络供电等优点<sup>[3-4]</sup>,十分适合于离岸岛屿供电等应用场景。

近年来,将 LCC 和 VSC 相结合而成的混合直流输电系统的研究成果较多,但更多关注于有源网

络和直流线路故障情况<sup>[5-8]</sup>。离岸岛屿远离大陆,通常采用海缆输电形式,直流线路故障率较低。但是,岛上电网结构较为薄弱,电源缺乏,因此需要特别关注受端网络在无源运行模式下的控制问题以及送端交流网络故障对受端电网的影响。

针对无源运行控制问题,文献[9-12]提出了多种 VSC 的无源控制策略,以满足无源网络电压频率稳定运行要求。文献[13]针对无源网络装设容性滤波装置后能够滤除高频谐波分量、向无源网络提供电压支撑等优点,提出了含容性滤波装置的 MMC 无源控制策略。本文针对该拓扑提出了一种新型的解耦控制策略。文献[6,8]对混合直流送端 LCC 交流系统故障可能出现的功率中断等问题进行了研究分析,但受端采用的都是有源网络。本文向无源网络供电的 LCC-MMC 混合直流输电系统有其技术特殊性,因此,较为细致地分析了送端交流故障对直流系统的影响,并提出了相关附加控制策略。

## 1 LCC-MMC 混合直流输电系统

### 1.1 系统结构

图 1 给出了向无源网络供电的 LCC-MMC 混合直流输电系统的拓扑结构示意图,其中,受端换流站安装有容性滤波装置。送端 LCC 的交流侧与有源网络相连,受端 MMC 的交流侧与无源网络连接,换流站之间通过直流海缆连接。LCC 将送端有源网络的电能输送至直流侧,MMC 工作在无源逆变

状态向无源网络输送有功和无功功率。容性滤波装置可以是电容器,也可以是二阶高通滤波器,在工频下二阶高通滤波器基本为纯容性<sup>[13]</sup>,可以忽略电阻和电抗,因此,本文采用纯电容  $C_f$  来模拟滤波装置。另外,将滤波装置装设在换流变压器网侧(低压侧)能够降低滤波装置的绝缘要求,节省成本。

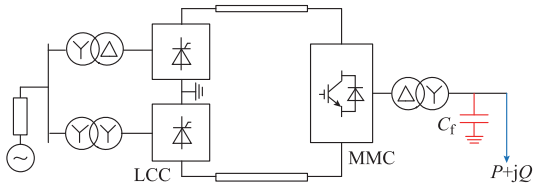


图1 向无源网络供电的 LCC-MMC 系统结构  
Fig.1 Configuration of LCC-MMC system connected to passive network

1.2 LCC 工作原理及控制策略

目前,LCC-HVDC 应用较为广泛的是 12 脉动换流器技术,因此,本文 LCC 采用 12 脉动结构形式。根据 LCC 运行特性,整流状态下的准稳态数学模型如下<sup>[14]</sup>:

$$U_{d1} = 2(U_{d0} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{d1}) \quad (1)$$

$$I_{d1} = \frac{U_{s1}}{\sqrt{2} X_r} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)) \quad (2)$$

$$P_{d1} = U_{d1} I_{d1} \quad (3)$$

$$Q_{d1} = P_{d1} \tan \varphi \quad (4)$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} (\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)) \quad (5)$$

式中: $U_{d0} = (3\sqrt{2}/\pi)U_{s1}$ ,其中  $U_{s1}$  为送端交流母线电压; $U_{d1}$  为送端直流极间电压; $I_{d1}$  为送端直流电流; $X_r$  为换相电抗; $\alpha$  为触发角; $\mu$  为换相重叠角。

LCC 通过对触发角  $\alpha$  的控制,实现对有功功率或直流电压的调节。LCC-MMC 混合直流输电系统中,MMC 主要用于实现受端交流电压和频率的稳定控制,整个直流输电系统的功率由受端有功负荷决定,因此,本文 LCC 采用定直流电压控制,为受端 MMC 提供有功功率传输所必需的稳定直流电压<sup>[1]</sup>。LCC 定直流电压控制框图如附录 A 图 A1 所示。

1.3 MMC 工作原理及控制策略

图 2 给出了图 1 内含容性滤波装置的 MMC 通用拓扑结构,其中,MMC 每个桥臂含有  $N$  个半桥子模块; $L_0$  为桥臂电感; $R_0$  为桥臂等效电阻; $L_s$  为换流变压器漏感; $C_f$  为滤波装置等效电容。 $u_{s2j}$  ( $j$  取 a,b,c,下同)为换流变压器网侧三相电压; $i_{s2j}$ ,  $i_{cj}$  和  $i_{oj}$  分别为流过换流变压器、滤波装置和流向无

源网络的各相电流; $u_{vj}$  为 MMC 交流输出电压; $u_{pj}$  和  $u_{nj}$  分别为 MMC 各相上、下桥臂输出电压; $i_{pj}$  和  $i_{nj}$  分别为 MMC 各相上、下桥臂电流; $U_{d2}$  为受端极间直流电压; $I_{d2}$  为受端直流电流。

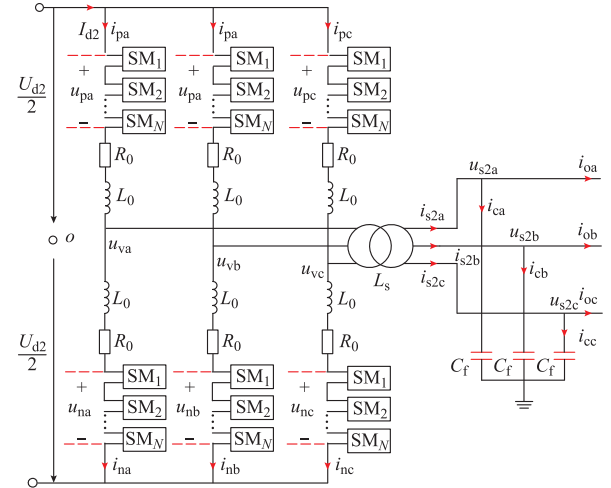


图2 含容性滤波装置的 MMC 拓扑结构  
Fig.2 Topology structure of MMC with a capacitive filtering device

根据图 2 所示各物理量的参考方向并将  $L_s$ ,  $C_f$ ,  $i_{s2j}$ ,  $u_{s2j}$ ,  $i_{cj}$  和  $i_{oj}$  折算至阀侧,对  $j$  相上、下桥臂分别应用基尔霍夫电压定律可得:

$$u_{s2j} + L_s \frac{di_{s2j}}{dt} = \frac{U_{d2}}{2} - u_{pj} - R_0 i_{pj} - L_0 \frac{di_{pj}}{dt} \quad (6)$$

$$u_{s2j} + L_s \frac{di_{s2j}}{dt} = -\frac{U_{d2}}{2} + u_{nj} + R_0 i_{nj} + L_0 \frac{di_{nj}}{dt} \quad (7)$$

对电容  $C_f$  所在点采用基尔霍夫电流定理,可得:

$$C_f \frac{du_{s2j}}{dt} = i_{cj} \quad (8)$$

$$i_{s2j} = i_{cj} + i_{oj} \quad (9)$$

将式(6)和式(7)相加除以 2 得到:

$$L \frac{di_{s2j}}{dt} + R i_{s2j} = u_j - u_{s2j} \quad (10)$$

式中: $u_j = (u_{nj} - u_{pj})/2$ ,  $u_j$  可看作是 MMC 交流侧虚拟点电压<sup>[15]</sup>;  $L = L_s + L_0/2$ ;  $R = R_0/2$ 。

式(8)至式(10)是描述换流站交流侧动态特性的方程组。对式(8)至式(10)施加 abc-dq 坐标变换(Park 变换)<sup>[16]</sup>,可以得到如下表达式:

$$\begin{cases} L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s2d} \\ i_{s2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{s2d} \\ u_{s2q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s2d} \\ i_{s2q} \end{bmatrix} \\ C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_{s2d} \\ u_{s2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega C_f \\ -\omega C_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s2d} \\ u_{s2q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{s2d} \\ i_{s2q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)进行拉普拉斯变换后,可以得到图 3 所示的含容性滤波装置的 MMC 等效模型。

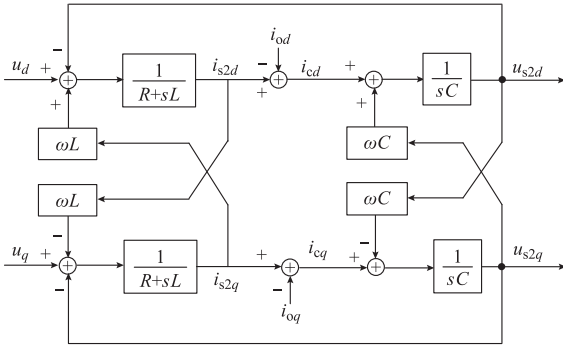


图 3 MMC 等效模型  
Fig.3 Equivalent model of MMC

MMC 需要向无源网络提供稳定的交流电压以保证电网的稳定运行,同时,MMC 还需要控制其交流侧的电流以有效避免暂态情况下 MMC 装置的过流问题。因此,在对 MMC 的控制器设计时,需要同时考虑定交流电流和定交流电压控制。借鉴传统 MMC 内外环控制原理,本文亦采用电压外环、电流内环的控制方法。

从图 3 可以看出,基于 Park 变换的 MMC 数学模型存在  $dq$  轴之间的耦合。 $d$  轴模型中,换算至  $u_d$  侧的  $q$  轴耦合分量为  $\omega L i_{s2q}$  和  $\omega C_f (R+sL) u_{s2q}$ ;  $q$  轴同理。为此,可采用前馈量补偿的解耦控制策略,即通过耦合信号的前馈项来抵消实际物理模型中的耦合项。因而,结合式(11)可以得到内环电流控制器的表达式为:

$$\begin{cases} u_{dref} = k_{p1} (i_{s2dref} - i_{s2d}) + k_{i1} \int (i_{s2dref} - i_{s2d}) dt - \\ \quad \omega L i_{s2q} - (R+sL) \omega C_f u_{s2q} \\ u_{qref} = k_{p2} (i_{s2qref} - i_{s2q}) + k_{i2} \int (i_{s2qref} - i_{s2q}) dt + \\ \quad \omega L i_{s2d} + (R+sL) \omega C_f u_{s2d} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $k_{p1}$  和  $k_{p2}$  为比例系数;  $k_{i1}$  和  $k_{i2}$  为积分系数;  $u_{dref}$  和  $u_{qref}$  分别对应 MMC 期望输出的基波电压参考值的  $d$  轴和  $q$  轴分量,通过适当的调制可获得 MMC 各桥臂子模块的触发脉冲;  $i_{s2dref}$  和  $i_{s2qref}$  分别对应流过换流变压器参考电流的  $d$  轴分量和  $q$  轴分量,它们由外环定交流电压控制器产生。

外环定交流电压控制器可简单通过比例-积分 (PI) 环节实现,结合式(12)可以获得图 4 所示的控制系统。在无源网络下无法通过锁相环 (phase locked loop, PLL) 获取同步相位,因此将参考相位设定为  $\theta = 2\pi f_0 t$ ,  $f_0 = 50$  Hz, 保证供电电压、频率的稳定性。

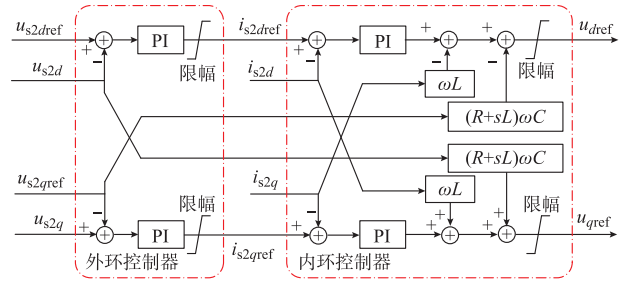


图 4 MMC 控制框图  
Fig.4 Control block diagram of MMC

受端安装容性滤波装置后,除能有效滤除高次谐波外,MMC+滤波装置向交流系统输出的无功功率(电压支撑能力)以及整个受端系统的阻抗特性均会被影响。另外,结合图 3 和图 4,可以获得附录 A 图 A1 所示的简化后的  $d$  轴和  $q$  轴闭环控制结构。从图 A1 可以看出,相比于传统的 MMC 控制闭环结构,安装容性滤波装置后,电容参数  $C_f$  被引入整个系统的特性环节,对系统特性以及控制器参数的整定有着直接影响。无论是对系统阻抗还是对控制器参数的影响,都需要建立详细的阻抗模型或参数优化设计模型来研究容性滤波装置对整个系统所带来的变化,本文一方面所讨论的主旨不在此,另一方面受限于论文篇幅,因此不再赘述。

## 2 送端交流故障特性分析

当送端交流系统发生故障时,附录 A 图 A2 所示的 LCC 定直流电压控制器将通过减小触发角  $\alpha$  以维持直流电压稳定。但是,当故障较为严重导致交流电压跌落较大的时候,触发角  $\alpha$  最小只能调节至  $5^\circ$ , 此时,从式(1)可以看出, LCC 直流出口侧的直流电压将随着交流电压的跌落而跌落。

对于 MMC 而言,将式(6)与式(7)相减,可以得到:

$$u_{pj} + u_{nj} = U_{d2} - 2R_0 (i_{pj} + i_{nj}) - 2L_0 \left( \frac{di_{pj}}{dt} + \frac{di_{nj}}{dt} \right) \quad (13)$$

相比于直流电压,  $R_0$  和  $L_0$  两项上的电压较小,可忽略不计,因此,式(13)可改写成:

$$u_{pj} + u_{nj} = U_{d2} \quad (14)$$

由于桥臂采用子模块级联方式,假设每个子模块的电压为  $U_c$ , 式(14)可变化为:

$$U_{d2} = (S_p + S_n) U_c \quad (15)$$

式中:  $S_p = \sum_{i=1}^N s_{ip}$ ,  $S_n = \sum_{i=1}^N s_{in}$ , 其中  $s_{ip}$  和  $s_{in}$  分别为上、下桥臂第  $i$  个子模块的开关函数,子模块切除时为 0,子模块投入时为 1。

在现有调制策略下,通常通过式(15)将单相上桥臂和下桥臂的电压和保持在  $U_{d2}$ ,以维持直流电压的稳定。

因此,当送端交流故障发生时刻,送端直流电压跌落和受端直流电压维持稳定的情况将导致出现送端直流电压小于受端的现象。由于 LCC 采用的晶闸管器件具有电流单向导通特性,直流电流将快速下降至 0,功率传输中断。功率中断期间,无源网络仍在不断汲取功率,导致 MMC 子模块电容向无源网络放电,以试图维持无源网络的功率平衡,子模块电容电压和直流电压将相应跌落。

由于子模块绝缘栅双极型晶体管(IGBT)驱动等电路取电于子模块电容,电容电压的下降可能导致电路板的不正常工作和断电。另一方面,电容电压的下降会导致 MMC 各控制变量发生变化,原本建立于稳态情况下的控制策略特性会产生额外影响因素,不利于 MMC 的可控运行。

假设送端交流系统故障期间,LCC 和 MMC 均不发生闭锁,那么,当故障切除后,由于触发角  $\alpha$  的调控存在延时,送端直流电压会立即恢复至较高水平。此时,受端直流电压因电容电压跌落会处于一个相对较低的值,且子模块电容电压恢复需要一个充电过程。因此,在送端交流故障切除后的短时间内,会出现较大的直流过电流,对系统设备产生不利影响。

3 送端交流故障穿越附加控制策略

结合上述分析,当送端交流系统发生故障时,为提高 LCC-MMC 的故障穿越能力,其控制策略必须尽量维持子模块电容电压的稳定,并将 MMC 控制在可控运行范围内,防止系统崩溃。

当送端交流故障发生后,假设送端直流电压降低至  $U_{dm}$ ,直流系统过负荷运行可承受的最大直流电流为  $I_{dm}$ ,那么,系统可继续传输的直流功率  $P_m$  理论上为  $U_{dm}I_{dm}$ 。为维持子模块电容电压稳定,无源网络负荷吸收的功率  $S=UI^*$  必须满足功率平衡条件,因此,无源网络吸收的有功功率应小于  $P_m$ 。由于  $S$  受无源网络交流电压的影响,因此,在故障阶段,应相应降低无源网络的交流电压,减少无源网络吸收的功率,使其满足功率平衡。另一方面,为实现功率续传,MMC 侧的直流电压应低于  $U_{dm}$ ,为满足 MMC 不过调制的要求,无源网络的交流电压也应根据直流电压的跌落情况,做出相应的减少。从上述两方面分析可以看出,为维持子模块电容电压平衡,同时满足 MMC 控制要求,需要将 MMC 直流侧电压和交流电压根据  $U_{dm}$  作相应变化。由此,提

出了图 5 所示的用于实现送端交流故障穿越的附加控制策略,其中,外环和内环控制器与图 4 一致,调制控制器采用经典的最近电平逼近方法<sup>[17]</sup>。

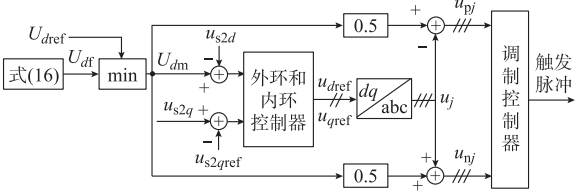


图 5 MMC 附加控制策略  
Fig.5 Additional control strategy of MMC

图中: $U_{dref}$ 为直流电压基准值,一般设置为 1.0 (标么值); $U_{dfi}$ 的表达式为:

$$U_{dfi} = 2 \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_m \cos(5^\circ) - \frac{3}{\pi} X_r I_{df} \right) \quad (16)$$

式中: $U_m$ 为送端实测的交流电压幅值,是由三相电压经 Clark 变换<sup>[16]</sup>后平方和再开根号得到的值,能够实时反映送端交流电压变化情况,此部分计算由送端完成,然后通过通信方式发送至受端,本文假设通信延时为 5 ms; $I_{df}$ 为受端实测的直流电流值; $X_r$ 为换相阻抗。

$U_{dref}$ 和  $U_{dfi}$ 经最小值比较后获得的  $U_{dm}$ 一方面输送至外环控制层,用于控制无源网络交流电压能够随着直流电压变化;另一方面输送至桥臂电压指令处理环节,用于调节 MMC 直流电压,由于调制控制器内不包含 PI 等控制环节,因此,受端直流电压能够迅速调节。假设送端交流故障情况下,无源网络频率稳定,那么,无源网络吸收的功率将与交流电压成一定的函数关系  $S=f(U)$ ,系统电流由送受端电路特性决定。当 MMC 侧的交流电流超出了允许运行范围,图 4 所示的 PI 限幅环节能够有效限制无源网络交流电流的大小,交流电压可自平衡。

4 仿真实验

4.1 仿真模型参数

为验证本文提出的向无源网络供电的 LCC-MMC 混合直流输电系统控制策略的有效性,在 PSCAD/EMTDC 内搭建了如图 1 所示的 LCC-MMC 仿真模型,其中 LCC 采用 12 脉动换流桥,MMC 采用 101 电平单换流器。LCC 采用定直流电压控制,MMC 采用图 4 所示的无源网络控制策略。模型参数如下:与 LCC 相连的送端有源网络交流母线额定电压为 220 kV;与 MMC 相连的受端无源网络交流母线额定电压为 35 kV;送端采用星形/星形和星形/三角形接法、变比均为 220 kV/85 kV 的换流变压器各一台;受端采用一台星形/三角形接法、

变比为 35 kV/100 kV 的换流变压器;送端交流系统短路比为 5.0。MMC 中,桥臂子模块数  $N=100$ ,子模块电容为  $6\,000\ \mu\text{F}$ ,子模块额定电压为 2 kV,桥臂电感  $L_o=14.9\ \text{mH}$ ,滤波装置等效电容  $C_f=20\ \mu\text{F}$ ,直流极间电压  $U_d=200\ \text{kV}$ ,送受端额定功率为 200 MW,系统额定频率为 50 Hz。无源网络采用阻抗等效方式,设置负荷阻抗为  $11\ \Omega$ ,功率因数为 0.9。

#### 4.2 电压频率变化

在  $t=0.7\ \text{s}$  时刻,通过调节电压外环控制器电压指令值的方式,将网侧交流线电压有效值从 35 kV 减小至 30 kV; $t=1.0\ \text{s}$  时刻,无源网络的频率从 50 Hz 升高至 55 Hz; $t=1.3\ \text{s}$  时刻,将网侧交流线电压有效值从 30 kV 恢复至 35 kV。附录 A 图 A3 分别给出了无源网络内网侧交流电压、阀侧交流电流、有功功率  $P$  和无功功率  $Q$ 、内环输出的  $dq$  轴电压指令值、系统频率以及外环输出的  $dq$  轴电流指令值的波形。从图中可以看出,额定运行工况下,无源网络吸收的有功功率和无功功率分别为 100 MW 和 48.6 Mvar。交流电压跌落至 30 kV 后,提供给无源网络的有功功率和无功功率均有一定程度的下降,阀侧交流电流也同时减少,响应过程在 0.05 s 内完成。无源网络频率控制的速率较快,频率上升后,提供给无源网络的有功功率减少,无功功率略有增加。

#### 4.3 常规控制下送端三相接地故障

$t=1.0\ \text{s}$  时刻,送端交流系统发生三相接地故障,交流电压跌落约 50%,系统的响应特性如附录 A 图 A4 所示。其中,图 A4(a)给出了送端交流电压瞬时值和有效值,图 A4(b)给出了送端和受端直流电压测量值,图 A4(c)给出了受端交流电压瞬时值,图 A4(d)给出了直流电流测量值,图 A4(e)给出了受端交流电流瞬时值,图 A4(f)给出了无源网络吸收的有功和无功功率,图 A4(g)给出了触发角的响应曲线,图 A4(h)给出了子模块电容电压的响应曲线。

故障发生后,与前文分析的一样,LCC 的触发角立即减小至  $5^\circ$ ,此时,送端所能提供的直流电压小于受端 MMC 常规控制下的直流电压值,因而直流电流迅速跌落为 0(晶闸管单向导通性),功率传输中断。由于无源网络仍继续从直流系统吸收功率,子模块电容电压快速下降,直流电压也随之变化。从附录 A 图 A4(b)和(h)可以看出,直流电压和子模块电容的变化趋势及变化比例基本一致。故障期间,子模块电容电压已跌落至 1.2 kV 左右,若故障持续时间更长,则电容电压跌落更厉害,会导致

MMC 进入闭锁状态。 $t=1.1\ \text{s}$  时,送端交流系统故障切除,交流电压立即恢复,但此时触发角仍维持在  $5^\circ$ ,进而导致送端直流电压会迅速上升至高于额定值的状态。与此同时,受端由于电容电压跌落,直流电压的恢复还需要一个过程,因而在此期间直流电流将处于过流状态,尤其是故障恢复瞬间,过电流达到了 2.4 kA。

#### 4.4 附加控制下送端三相接地故障

附录 A 图 A5 给出了附加控制条件下,送端交流系统发生三相接地故障(电压跌落约 50%)后的系统响应特性情况,图 A5(a)至(h)的含义与图 A4(a)至(h)相一致。故障发生后,受端直流电压由于控制延时等因素,直流电流首先迅速跌落,附加控制能够使得受端直流电压较好地跟随送端交流电压跌落的幅值特性,因而直流电流在故障期间开始逐渐恢复。由此,受端 MMC 在维持子模块电容电压稳定的情况下,能够持续为无源网络提供 28 MW 的有功功率,保障无源网络的用电需求。故障切除后,同样由于触发角调节滞后,直流系统存在过电流现象,由于子模块电容电压在故障期间能够较好地维持在额定值状态,因此,相较于常规控制状态,过电流严重情况有所缓解,最大为 1.6 kA。

#### 4.5 附加控制下送端单相接地故障

附录 A 图 A6 给出了附加控制条件下,送端交流系统发生单相接地故障(A 相电压跌落约 80%)后的系统响应特性情况,图 A6(a)至(h)的含义与图 A4(a)至(h)相一致。送端单相接地故障情况下,直流电压跌落不严重,因此,直流系统还保有向无源网络输送 62 MW 功率的能力。附加控制能够较好地维持子模块电容电压的稳定,故障切除后,由于故障期间直流电压跌落不严重,因而恢复时刻的过电流也较小。

### 5 结论

本文基于 LCC-MMC 混合直流输电系统向无源网络供电的场景,针对无源网络控制问题,提出了含容性滤波装置的 MMC 无源解耦控制策略;针对送端交流系统故障出现的功率中断、子模块电容电压跌落等现象,提出了送端交流故障穿越附加控制策略。通过理论分析和仿真验证,得到如下结论。

1)本文提出的含容性滤波装置的 MMC 无源解耦控制策略能够有效实现无源网络电压频率的稳定控制,实现无源网络的正常运行。

2)对于 LCC-MMC 混合直流输电系统而言,常规控制下,送端交流故障会引发功率传输中断、子模块电容电压跌落,故障切除后,伴随有较大的直流过

电流,会对直流设备产生冲击。

3)送端交流故障穿越附加控制策略能够有效实现送端多种交流故障情况下的功率续传,且能够维持好故障期间 MMC 子模块电容电压的稳定,有效解决了常规控制下的相关问题。

4)未来含有 LCC 和 MMC 的多端混合直流输电系统具有较好的应用前景。本文所述方法是否同样适用于多端混合直流输电系统,若不适用,又应采用怎样的措施有待进一步研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 唐庚,徐政,薛英林.LCC-MMC 混合直流输电系统[J].电工技术学报,2013,28(10):301-310.  
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.

[2] 张哲任,徐政,薛英林.LCC-MMC 混合直流输电系统直流侧谐波电流计算[J].电力系统自动化,2014,38(23):65-70. DOI: 10.7500/AEPS20130620013.  
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Calculation of DC side harmonic currents for LCC-MMC hybrid HVDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 65-70. DOI: 10.7500/AEPS20130620013.

[3] 郭春义,刘文静,赵成勇,等.混合直流输电系统的参数优化方法[J].电力系统自动化,2015,39(11):96-102. DOI: 10.7500/AEPS20140316001.  
GUO Chunyi, LIU Wenjing, ZHAO Chengyong, et al. Parameters optimization method of hybrid HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 96-102. DOI: 10.7500/AEPS20140316001.

[4] 刘志超,时伯年,刘斌,等.基于最大调制比的 LCC-MMC 混合直流交流侧故障控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(4):125-130. DOI:10.7500/AEPS20160701006.  
LIU Zhichao, SHI Bonian, LIU Bin, et al. Control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC transmission under AC system fault based on maximum modulation index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 125-130. DOI: 10.7500/AEPS20160701006.

[5] 余瑜,刘开培,陈灏泽,等.伪双极 VSC-LCC 型混合直流输电系统启动方法[J].高电压技术,2014,40(8):2572-2578.  
YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Haoze, et al. Startup procedure for VSC-LCC based hybrid pseudo bipolar HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2572-2578.

[6] 薛英林,葛风雷,赵峥,等.LCC-C-MMC 混合高压直流系统直流低电压穿越控制策略[J].高电压技术,2016,42(1):85-96.  
XUE Yinglin, GE Fenglei, ZHAO Zheng, et al. DC Low-voltage ride-through control strategy of LCC-C-MMC hybrid HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 85-96.

[7] 徐政,屠卿瑞,管敏渊,等.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2013:1-25.

[8] 许烽,徐政.基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J].高电压技术,2014,40(8):2520-2530.  
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.

[9] 管敏渊,徐政.MMC 型柔性直流输电系统无源网络供电的直接电压控制[J].电力自动化设备,2012,32(12):1-5.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Direct voltage control of MMC-based VSC-HVDC system for passive networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 1-5.

[10] 包宗贤,邹超.向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统的新型控制器设计[J].电力系统保护与控制,2008,36(14):22-27.  
BAO Zongxian, ZOU Chao. New control design for VSC-HVDC supplying passive networks [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 22-27.

[11] 王卫安,桂卫华,马雅青,等.向无源网络供电的模块化多电平换流器型高压直流输电系统控制器设计[J].高电压技术,2012,38(3):751-761.  
WANG Wei'an, GUI Weihua, MA Yaqing, et al. Control design for MMC-HVDC system connected to passive network [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 751-761.

[12] 梁营玉,张涛,刘建政,等.向无源网络供电的 MMC-HVDC 逆变站高性能控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(23):119-125. DOI:10.7500/AEPS20150127008.  
LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. High performance control strategy for inverter station of MMC-HVDC connected to passive network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 119-125. DOI: 10.7500/AEPS20150127008.

[13] 管敏渊,徐政.向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J].电工技术学报,2013,28(2):255-263.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.

[14] 郭龙,刘崇茹,负飞龙,等. $\pm 1100$  kV 直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J].电力系统自动化,2015,39(11):24-30. DOI:10.7500/AEPS20140903006.  
GUO Long, LIU Chongru, YUN Feilong, et al. Power coordination control of  $\pm 1100$  kV UHVDC system with hierarchical connection mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 24-30. DOI: 10.7500/AEPS20140903006.

[15] 管敏渊,徐政.模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制[J].电力系统自动化,2010,34(19):64-68.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 64-68.

[16] 张静.VSC-HVDC 控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2009.

[17] 周月宾.模块化多电平换流器型直流输电系统的稳态运行解析和控制技术研究[D].杭州:浙江大学,2014.

许 烽(1988—),男,通信作者,博士,工程师,主要研究

方向:高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术。E-mail: xuf\_1988@ 163.com

宣晓华(1965—),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护和自动化。

陆 翌(1979—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:高压直流输电和柔性直流输电及大功率电力电子技术。

(编辑 孔丽蓓)

## Control Strategies for LCC-MMC Hybrid DC System Connected to Passive Networks

*XU Feng<sup>1,2</sup>, XUAN Xiaohua<sup>1</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, QIU Peng<sup>1</sup>, HUANG Xiaoming<sup>3</sup>, YU Haihong<sup>1</sup>, JIANG Daozhuo<sup>2</sup>*

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310014, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Huzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** The line commutated converter-modular multilevel converter (LCC-MMC) hybrid DC system has good application prospects for combining the technical and economic advantages of two kinds of converters. The capacitive filtering device installed on the passive network can smooth the AC voltage waveform, provide voltage support, etc. Firstly, a mathematical model of the modular multilevel converter (MMC) containing the capacitive filtering device is developed through theory deduction, and the decoupling control strategy of the MMC is proposed based on the dq theory. For the problem of power transmission interruption during AC fault at the sending end of line commutated converter (LCC), the system fault response characteristic is analyzed by proceeding from the control mechanism of LCC and MMC. Then an additional control strategy for the sending-end AC fault ride-through is put forward. In order to verify the effectiveness of the control strategies, a LCC-MMC hybrid DC transmission model is established in PSCAD/EMTDC. The feasibility and effectiveness of the proposed control strategies are verified by the simulation of the voltage/ frequency variation at the receiving end and the AC fault at the sending end.

**Key words:** hybrid DC; line commutated converter (LCC); modular multilevel converter (MMC); decoupling control strategy; AC fault ride-through