137

混联式直流电网的协调控制策略

帆1,徐 鹏1,贾秀芳1,赵成勇1,王 峰2,许建中1 张

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206:2. 中国电力科学研究院,北京 100192)

摘要:为解决传统电网换相高压直流输电与电压源换流器高压直流输电在直流电网中的混联问题,针对一 种新型的混联直流输电系统进行了研究。该系统是整流侧采用模块化多电平换流器、逆变侧采用晶闸管换 流器的四端双极混联直流电网。推导了该系统稳态时的数学模型,针对其逆变侧易发生换相失败的问题, 设计了新的抑制换相失败的协调控制策略。在整流侧换流站中通过低压限压和低压限功率控制的配合,抑 制逆变侧故障电流的增大,从而减小换相失败发生的概率。在 PSCAD/EMTDC 中对该混联直流电网的稳态 和暂态特性进行了仿真分析,仿真结果证明了所提控制策略的有效性。

关键词:直流电网:混联直流输电系统:换相失败:控制:高压直流输电

中图分类号: TM 721.1 文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.022

引言 0

电网换相高压直流输电 LCC-HVDC(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current) 以其在远距离大容量和异步电网背靠背互联等方面 的优势,已成为我国西电东送的主要输电方式,在电 网中发挥着无可替代的作用^[1]。但是 LCC-HVDC 存 在着逆变侧 LCC 易发生换相失败、消耗大量无功、对 交流系统依赖程度高等缺陷,在一定程度上制约了 它的发展[2-4]。20世纪90年代后,电压源换流器高 压直流输电 VSC-HVDC (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current)得到了快速发展。 VSC-HVDC 具有不存在换相失败、没有无功补偿问 题、可为无源系统供电以及可同时相互独立控制有 功和无功等优点55,在联接弱交流系统和实现新能 源接入等方面具有很大优势[3]。

混合型高压直流输电(hybrid-HVDC)能够综合 以上2种技术的优点,成为目前新的研究热点[6-13]。 文献[14]提出了一种送端采用 LCC、受端采用 VSC 的混合直流输电技术,成功地结合了传统 HVDC 技 术成熟、成本低廉和 VSC-HVDC 技术调节性良好 的优点。文献[15]提出了一种整流侧采用 VSC、逆 变侧采用 LCC 的混合直流输电系统,建立了其数 学模型,并针对其逆变侧 LCC 易发生换相失败的情 况,设计了相应的控制策略。文献[16]提出了一种 由 LCC 正极和 VSC 负极组成的混合双极 HVDC 系 统的模型,并设计了正负极之间的相互协调控制策 略。文献[3]提出了一种整流侧采用 LCC、逆变侧采

用模块化多电平换流器(MMC)的新型混合直流输 电系统,详细研究了其稳态控制策略和启动策略。 文献[17]研究了一种由VSC、电流源换流器构成的 新型混合三端直流输电系统。

上述文献提出的混合型 HVDC 系统,成功地结 合了 LCC 与 VSC 二者的优点,为直流输电的发展提 供了宝贵的参考意见。现有文献所提出的拓扑大多 是基于两端或者多端的混合直流输电系统,而关于 混联式直流电网的研究较少。随着多端直流输电的 快速发展,直流电网将会成为未来电网的重要发展 方向[18-19]。由于目前世界上已投运的绝大部分工程 采用晶闸管换流阀进行换流,而以全控型器件为基 础的 VSC-HVDC 最近几年得到快速发展,那么在此 基础上建设的直流电网必然会涉及 LCC 与 VSC 的 混联问题,这就需要对混联直流电网的相关内容进 行研究。

本文首先提出了一种混联式直流输电系统的通 用模型,探讨了该模型的几种运行方式;然后重点研 究了整流侧采用 MMC、逆变侧采用 LCC 的四端双极 混联式电网结构,建立其数学模型,分析该系统的运 行特性。针对其逆变侧 LCC 可能发生换相失败的问 题,设计了抑制其换相失败的协调控制策略。针对 上述混联结构与控制策略,在 PSCAD/EMTDC 仿真 平台中进行了验证,结果表明所提出的协调控制策 略在稳态情况下能够保证系统正常稳定运行,在暂 态情况下可以有效降低换相失败发生的概率。

混联直流电网的结构与原理 1

1.1 混联直流电网的结构

为了研究不同类型的混合直流输电系统特性和 控制策略,建立如图1所示的混合系统拓扑结构的 通用模型。该模型包括2回直流输电线路,线路1

收稿日期:2015-11-06:修回日期:2016-10-08

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013-AA050105)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA05-0105)



图 1 混合直流输电系统通用模型

Fig.1 General model of hybrid HVDC system

连接交流系统 $S_1 和 S_3$,线路 2 连接交流系统 $S_2 和 S_4$,其中交流系统采用理想电压源加等值阻抗的 模型。线路 1 和线路 2 的两端分别由 MMC 换流站 和 LCC 换流站组成,其中 MMC 换流站每个桥臂采 用 10 个子模块,正常时可输出 11 电平的电压波形, LCC 换流站采用 2 个 6 脉动换流器串联而成。每端 换流器由 2 个同种类型的换流器组成双极结构,并 通过直流线路进行连接。

模型中 LCC 换流站可以工作在整流和逆变 2 种状态下,同时在 2 条线路的 MMC 换流站、LCC 换 流站直流侧之间分别设置了断路器 QF₁ 和 QF₂,线 路 1 的 MMC 换流站母线和线路 2 的 LCC 换流站母 线之间设置了断路器 QF₃,通过控制 QF₁、QF₂ 和 QF₃ 处于不同的开断状态,该模型可以模拟混联式直流 输电系统的多种运行方式。

a. 工作方式 1:2 条线路的 MMC 作为整流站, LCC 作为逆变站,同时 QF₁闭合,即 2 条线路的 MMC 换流站并联后向远方 2 个不同交流系统输电。此 种工况可模拟风电场换流器并联后向远方送电的 场合。

b. 工作方式 2:2 条线路的 MMC 作为整流站, LCC 作为逆变站,同时 QF₁、QF₂ 闭合,即形成一个四 端混联式直流电网,MMC 侧向 LCC 侧输送功率。

c. 工作方式 3:2 条线路的 MMC 作为逆变站, LCC 作为整流站,同时 QF₂ 闭合,即 2 条线路的 LCC 换流站并联后向远方 2 个不同交流系统输电。此种 工况下用 MMC 改善受端交流系统,避免了逆变侧为 LCC 时可能发生的换相失败。

d. 工作方式 4:2 条线路的 MMC 作为逆变站, LCC 作为整流站,同时 QF₁、QF₂ 闭合,即形成一个四 端混联式直流电网,LCC 侧向 MMC 侧输送功率。

e. 工作方式 5:线路 1 的 MMC 和线路 2 的 LCC 作为逆变站,线路 1 的 LCC 和线路 2 的 MMC 作为

整流站,QF₃闭合,同时合并逆变站连接的2个等值 交流系统,即受端电网形成了混合双馈入输电系统。

本文主要研究工作方式 2,即整流侧为 MMC、逆 变侧为 LCC 的四端混联式直流电网结构。

1.2 混联直流电网的运行原理

整流侧为 MMC、逆变侧为 LCC 的四端混联式 直流电网结构如图 2 所示。其中线路 1 的额定直流 电压为±500 kV,额定直流电流为 1.2 kA,系统正常 运行时输送的额定功率为 1 200 MW;线路 2 的额定 直流电压为±500 kV,额定直流电流为 3 kA,系统正 常运行时输送的额定功率为 3 000 MW。

为了便于分析,定义线路1上整流侧换流站为 MMC₁,线路2上整流侧换流站为 MMC₂;线路1上逆 变侧换流站为 LCC₁,线路2上逆变侧换流站为 LCC₂。

在图 2 中, MMC 换流站的有功类和无功类控制 策略均配备了 2 种控制, 有功类控制方式可选择定 有功功率或者定直流电压, 无功类控制方式可选择 定无功功率或者定交流电压, 控制方式灵活。本文 的混联直流系统采用的基本控制策略如表 1 所示。

整流侧 MMC 的有功功率传输主要由交流电压 基频分量 U_s 与换流器交流侧输出电压基频分量 U_c 的移相角度 δ 决定,无功功率主要由交流侧输出电 压的基波幅值决定^[20],如式(1)所示。

$$P_{s1} = \frac{U_1 U_{c1}}{X_1} \sin \delta_1$$

$$P_{s2} = \frac{U_2 U_{c2}}{X_2} \sin \delta_2$$

$$Q_{s1} = \frac{U_1 (U_{c1} \cos \delta_1 - U_1)}{X_1} \sin \delta_1$$

$$Q_{s2} = \frac{U_2 (U_{c2} \cos \delta_2 - U_2)}{X_2} \sin \delta_2$$
(1)

其中,X₁、X₂分别为线路1和线路2上整流侧换流变 压器和换流电抗器的等值电抗。采用正弦脉宽调制



图 2 整流侧为 MMC、逆变侧为 LCC 的四端混联直流电网结构示意图 Fig.2 Structural diagram of four-terminal hybrid HVDC grid with MMC at rectifier side and LCC at inverter side

表1 各换流站基本控制策略

Table 1 Basic control strategy of different converter stations

线路	换流站	控制策略	
线路1	MMC_1	定有功功率 1200 MW 或	
		定无功功率	
	LCC1	定直流电流 1.2 kA	
		(附加 VDCOL 控制)	
线路 2	MMC ₂	定直流电压±500 kV 或	
		定交流电压	
	LCC ₂	定直流电流 3.0 kA	
		(附加 VDCOL 控制)	

(SPWM)方式时,整流侧直流电压如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_{dc1} = 2\sqrt{2} U_{c1} / (\sqrt{3} M_1) \\ U_{dc2} = 2\sqrt{2} U_{c2} / (\sqrt{3} M_2) \end{cases}$$
(2)

其中, U_{de1} 和 U_{de2} 分别为换流站 MMC₁ 和 MMC₂ 的直 流电压: M₁ 和 M₂ 为调制比。

逆变侧 LCC 的可控量只有触发延迟角,其直流 电压如式(3)所示。

$$U_{dc3} = 1.35U_3 \cos\beta_3 + \frac{3}{\pi} X_{r3} I_{dc3}$$

$$U_{dc4} = 1.35U_4 \cos\beta_4 + \frac{3}{\pi} X_{r4} I_{dc4}$$
(3)

其中, U_{dc3} 和 U_{dc4} 分别为换流站LCC₁和LCC₂的直流 电压; U_3 和 U_4 为逆变侧交流电压; X_{r3} 和 X_{r4} 为LCC 换流站等值换相电抗; β_3 和 β_4 为触发超前角; I_{dc3} 和 I_{dc4} 为流入2个LCC换流站的直流电流。

逆变侧换相角如式(4)所示。

$$\begin{pmatrix}
\mu_{3} = \arccos\left(\cos\gamma_{3} - \frac{2X_{r3}I_{dc3}}{\sqrt{2}U_{3}}\right) - \gamma_{3} \\
\mu_{4} = \arccos\left(\cos\gamma_{4} - \frac{2X_{r4}I_{dc4}}{\sqrt{2}U_{4}}\right) - \gamma_{4}
\end{cases}$$
(4)

其中, μ_3 和 μ_4 为逆变侧 LCC 换流站的换相角; γ_3 和 γ_4 为关断角。

以换流站 LCC₁ 为例,当其交流侧发生短路故障时,会造成交流母线电压 U_3 下降,引起逆变侧直流电压 U_{d3} 下降,导致直流电流 I_{d3} 上升,换相角 μ_3 增大,由于 $\gamma_3 = \beta_3 - \mu_3$,导致关断角 γ_3 减小。故障严重时可能导致换流站 LCC₁ 发生换相失败。流入逆变侧 LCC₁ 的直流电流如式(5)所示。

$$I_{\rm dc3} = \frac{U_{\rm dc1} - U_{\rm dc3}}{R_{13}} + \frac{U_{\rm dc4} - U_{\rm dc3}}{R_{34}}$$
(5)

其中, R₁₃为直流线路1的电阻; R₃₄为逆变侧线路1 与线路2之间的电阻。

$$\begin{bmatrix} I_{13} = \frac{U_{dc1} - U_{dc3}}{R_{13}}, & I_{12} = \frac{U_{dc1} - U_{dc2}}{R_{12}} \\ I_{dc1} = I_{12} + I_{13}, & I_{dc1} = P_1 / U_{dc1} \end{bmatrix}$$
(6)

其中,*I*₁₃为由换流站 MMC₁流向换流站 LCC₁的电流;*I*₁₂为由换流站 MMC₁流向换流站 MMC₂的电流; *I*_{del}为换流站 MMC₁流出的电流;*R*₁₂为整流侧线路 1 与线路 2 之间的电阻。由式(6)可得:

$$U_{de3} = U_{de1} \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{12}} \right) - U_{de2} \frac{R_{13}}{R_{12}} - R_{13} \frac{P_1}{U_{de1}}$$
(7)

将式(7)代入式(5)中整理得:

$$I_{\rm dc3} = U_{\rm dc2}A + \frac{P_1}{U_{\rm dc1}}B - U_{\rm dc1}C + U_{\rm dc4}D$$
(8)

其中, $A = 1/R_{12} + R_{13}/(R_{12}R_{34})$; $B = 1 + R_{13}/R_{34}$; $C = 1/R_{24} + 1/R_{34} + R_{13}/(R_{12}R_{34})$; $D = 1/R_{34\circ}$

将式(8)代入式(4)的µ3中可以得到:

$$\mu_{3} = \arccos \left[\cos \gamma_{3} - \frac{2X_{r3}(U_{dc2}A + P_{1}B/U_{dc1} - M)}{\sqrt{2} U_{3}} \right] - \gamma_{3}(9)$$

其中,
$$M = U_{dcl}C - U_{dc4}D_{\circ}$$

由于 A、B、C、D 都是常数,所以由式(9)可以看 出整流侧定直流电压站的直流电压 U₄₂ 和定功率站 的有功功率 P_1 会对逆变侧 LCC₁ 的直流电流 I_{de3} 产 生影响,进而影响其换相角 $\mu_{3\circ}$ U_{de2} 和 P_1 减小,换相 角 μ_3 减小,则关断角 γ_3 的裕度增大,因此整流侧 MMC 换流站对逆变侧 LCC 换流站的换相失败产生影响, 给下文控制策略的设计提供了指导思想。

2 混联直流电网的协调控制策略

针对整流侧为 MMC、逆变侧为 LCC 的混联式直流电网逆变侧可能发生换相失败的问题,在 1.2 节基本控制策略的基础上,提出了抑制混联直流电网 LCC 换相失败的协调控制策略。

对于较弱受端交流系统,当逆变侧 LCC 交流侧 发生短路故障时,如果整流侧不采取任何控制措施, 将会造成逆变侧直流电压下降,直流电流迅速增大, 导致换相角增大,关断角减小,系统容易发生换相失 败。因此限制故障时流向逆变侧 LCC 的直流电流, 能够在一定程度上抑制换相失败的发生。经 1.2 节 的分析可得:混联直流电网中整流侧的 MMC 和逆变 侧的 LCC 通过直流网络相互耦合,整流侧直流电压 和有功功率会对逆变侧直流电流产生影响,通过控 制整流侧定直流电压站的直流电压和定功率站的有 功功率,可以抑制故障时流向逆变侧直流电流的增 大,从而减小 LCC 发生换相失败的可能。

根据上述分析,在整流侧定直流电压换流站 MMC₁ 和定有功功率换流站 MMC₂中分别加入低压限直 流电压 VDVOL(Voltage Dependent Voltage Order Limiter)和低压限有功功率 VDPOL(Voltage Dependent Power Order Limiter)控制可以抑制流向 LCC 直 流电流的增大。其原理如图 3 所示,图中 U_{ac} 为系统 逆变侧交流电压值, U_{deref} 和 P_{deref} 分别为整流侧直流 电压和有功功率参考值, U_{deref} 和 Q_{nf} 分别为整流侧直 流电压和有功功率参考值, U_{acref} 和 Q_{nf} 分别为整流侧 交流电压和无功功率参考值, U_{acref} 和 Q_{nf} 分别为整流侧 直流电压和无功功率参考值, U_{acref} 和 Q_{nf} 分别为整流 侧交流电压和无功功率参考值, U_{acref} 和 Q_{nf} 分别为整流 剩支流电压



图 3 含 VDVOL(VDPOL)控制器原理图

Fig.3 Schematic diagram of controller with VDVOL(VDPOL)

以 LCC₁ 为例,当检测到其交流侧发生故障时, 启动整流侧低压限压和低压限功率控制,降低相应 的参考值,电压和功率的降低程度取决于逆变侧交流母线电压的下降程度^[1],故障消失后,参考值上升 至额定值,系统恢复原有功率传输。该控制策略能 够在逆变侧 LCC₁交流母线发生故障时,抑制其直流 电流的增大,降低换相失败发生的概率。

通过仿真分析,并考虑一定的裕度以及电压波 动范围后,确定 VDVOL 和 VDPOL 的参数设置分别 如式(10)和式(11)所示。

	1.0 p.u.	$U_3 \ge 0.95$ p.u.	
$U_{ m dc2}$ =	$= 2.86U_3 - 1.72$	$0.85 \text{ p.u.} < U_3 < 0.95 \text{ p.u.}$	(10)
	0.5 p.u.	$U_3 \le 0.85$ p.u.	
	1.0 p.u.	$U_3 \ge 0.95$ p.u.	
$P_1 =$	$2.78U_3 - 1.64$	$0.85 \text{ p.u.} < U_3 < 0.95 \text{ p.u.}$	(11)
	0.5 p.u.	$U_3 \le 0.85$ p.u.	

其中, U_{de2} 为整流侧定直流电压站的直流电压值; P₁ 为整流侧定功率站的有功功率值; U₃ 为逆变侧换流站 LCC₁ 的交流电压。

3 仿真验证及分析

3.1 仿真算例说明

本文在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建 1.2 节中的 混联直流电网仿真模型,该混合直流系统参数如 表 2 所示。正常运行时整流侧 MMC₂ 定直流电压 ± 500 kV, MMC₁ 定有功功率 1200 MW, 逆变侧 LCC₁ 和 LCC₂ 分别定直流电流 1.2 kA 和 3.0 kA, 超前触发 角为 37.5°, 关断角为 13.5°。

表 2 线路 1 和线路 2 上换流站参数

Table 2 Converter station parameters of Line 1 and 2

线路1整	流侧 MMC	线路1逆变侧LCC		
交流系统	桥臂电阻/ 电感/电容	交流系统	单个换流器 无功补偿容量	
247.58 kV 8.48∠75° Ω SCR=2.5	2 Ω/0.09 H/ 500 μF	215.05 kV $17.66 \angle 75^{\circ} \Omega$ SCR=2.5	375 Mvar	
线路2整	流侧 MMC	线路2逆变侧LCC		
交流系统	桥臂电阻/ 电感/电容	交流系统	单个换流器 无功补偿容量	
247.58 kV 3.18∠75° Ω SCB-2.5	2Ω/0.032H/ 1300 μF	215.05 kV $7.06 \angle 75^{\circ} \Omega$ $SCB = 2.5$	939 Mvar	

引入故障容量^[2]FL(Fault Level)这一概念来表 征故障的严重程度,如式(12)所示。

$$FL = \frac{U^2/Z}{P} \times 100\%$$
(12)

其中,U为逆变侧交流母线电压有效值;Z为接地阻抗值;P为该换流站的额定功率。

需要说明的是,由于线路正负极换流器的运行 特性基本相似,在仿真的过程中只分析了线路1、线 路2正极 MMC 及 LCC 换流站的运行特性。

针对整流侧为 MMC、逆变侧为 LCC 的混联直流

电网,为了验证本文所设计的协调控制策略的有效 性,将对比如下2种控制策略:(1)基本控制策略,即 整流侧 MMC₁为定有功功率控制,整流侧 MMC₂为 定直流电压控制,逆变侧 LCC₁和 LCC₂为带有低压 限流的定直流电流控制;(2)协调控制策略,即整流 侧 MMC₁为加入低压限功率的定有功功率控制,整 流侧 MMC₂为加入低压限压的定直流电压控制,逆 变侧 LCC₁和 LCC₂为带有低压限流的定直流电流 控制。

在 PSCAD 中对以下情况进行了仿真:稳态运行 时定直流电压站电压发生阶跃;逆变侧 LCC₁ 交流母 线发生单相经电阻接地故障。

3.2 稳态仿真分析

稳态运行时 MMC₂ 为定直流电压控制,直流电 压参考值为 500 kV,0.7 s 时将直流电压参考值降为 400 kV,1.0~1.2 s 使其斜坡上升至 500 kV;MMC₁ 为 定有功功率控制,参考值为 600 MW。

LCC₁和LCC₂为带有低压限流的定直流电流控制,初始参考值分别为 1.2 kA 和 3.0 kA。当 0.7 s 时MMC₂换流站直流电压发生阶跃,仿真结果如图 4 所示。图中, U_{dem} 和 U_{deref} 分别为MMC₂的直流电压实际值和参考值; I_{ref1} 和 I_{n1} 分别为LCC₁的直流电流参考值和实际值, I_{ref2} 和 I_{m2} 分别为LCC₂的直流电流参考值和实际值; P_{m2} 为MCC₂的有功功率。



Fig.4 Characteristic curves of system response to step change of DC voltage

从图 4 中可以看到,在 0.7~1.2 s 时 MMC₂ 换流 站的直流电压 U_{dem} 能够很好地追踪其参考值。随着 直流电压的降低,逆变侧换流站的低压限流控制发 挥作用,LCC₁ 的直流电流 I_{m1} 从 1.2 kA 下降至 0.9 kA, LCC₂ 的直流电流 I_{m2} 从 3 kA 下降至 2.6 kA,测量值基 本能够快速追踪参考值。在电压下降瞬间,其余 3 个换流站的电压均高于 MMC₂ 的电压值,因此 MMC₂ 换流站的有功功率 P_{m2} 会出现负值现象。在 0.7~1.0 s 时随着全网直流电压下降,逆变侧直流电流降低,接收的功率减少,所以定直流电压站 MMC₂ 的有功功率相应减少,从而实现系统的功率平衡,电压恢复正常之后,系统恢复正常功率传输。

3.3 暂态仿真分析

在 1.5s 时逆变侧 LCC₁ 交流母线发生单相接地 故障,故障阻抗值为 162Ω,故障持续时间 0.1s,由式 (11)得出故障容量为 27.2%。采用基本控制策略和 协调控制策略的仿真结果分别如图 5、图 6 所示。



图 5 采用基本控制策略时仿真结果

Fig.5 Simulation results with basic control strategy



图 5 为采用基本控制策略时的仿真结果。图 中, γ_1 为换流站 LCC₁的关断角; α_1 为换流站 LCC₁的 滞后触发角; P_{ml} 为 MMC₁的有功功率; U_{de2} 为 MMC₂ 的直流电压。在 1.5s 时逆变侧 LCC₁交流母线发生 短路故障,直流电压下降,直流电流迅速增大,关断 角 γ_1 在故障瞬间从 13.5°降至 0°,发生换相失败,功

coordinated control strategy

率传输中断,系统难以从故障中恢复。

图 6 为采用在整流侧定直流电压和定有功功率 换流站中分别加入低压限压和低压限功率的协调控 制策略仿真结果。图中, P_{reft} 为 MMC₁ 的有功功率参 考值。采用该协调控制策略, 当逆变侧 LCC₁ 交流母 线发生相同的短路故障时, 关断角在故障瞬间有所 下降, 但并未降至 0°, 系统没有发生换相失败。故障 发生时, 该控制策略能够减小整流侧定电压换流站 的直流电压和定功率换流站的有功功率, 从而抑制 LCC₁ 关断角的继续减小。

考虑 2 ms 的信号传递延时, 当检测到逆变侧 LCC₁ 发生故障时, 整流侧 MMC₂ 的直流电压 U_{dem} 从正常 运行时的 500 kV 下降到 400 kV, 同时 MMC₁ 的有功 功率 P_{ml} 从原来的 600 MW 下降到 350 MW, 抑制直 流电流的增大, 从而使换相角变小, 为关断角留下 裕度, 避免了换相失败的发生。故障结束后换流站 MMC₂ 的直流电压 U_{dem} 和 MMC₁ 的有功功率 P_{ml} 恢 复至原来值, 系统恢复正常功率传输。

4 结论

本文首先建立了混合直流输电系统的通用模型,分析了其多种运行方式及应用场景;然后重点研究了一种整流侧采用 MMC、逆变侧采用 LCC 的四端双极混联式电网结构,建立了稳态数学模型,设计了基本控制策略。

针对该混联直流电网逆变侧 LCC 易发生换相 失败的问题,在研究该系统数学模型的基础上,提出 了一种抑制换相失败的协调控制策略,即在整流侧 定直流电压换流站中加入低压限压控制,同时在定 有功功率换流站中加入低压限功率控制。

为验证所提出的协调控制策略的有效性,在 PSCAD/EMTDC中进行了仿真对比分析。结果表 明,在一定故障容量下所设计的协调控制策略,可以 降低换相失败发生的概率。

参考文献:

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2004:1-3.
- [2] 赵成勇. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版社, 2014: 2-8.
- [3] 唐庚,徐政,薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[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.
- [4] 郭春义,刘文静,赵成勇. 电压源电流源混合型高压直流输电控制方法研究[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(11):1281-1288.
 GUO Chunyi,LIU Wenjing,ZHAO Chengyong. Research on the control method for voltage-current source hybrid-HVDC system[J].
 Science China Technological Sciences,2013,43(11):1281-1288.

- [5] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版 社,2004:2-5.
- [6] KOTB O, SOOD V K. A hybrid HVDC tranmission system supplying a passive load[C] // Electric Power and Energy Conference(EPEC). [S.l.]:IEEE,2010:1-5.
- [7] 袁旭峰. 新型混合多端直流输电系统理论及其若干关键问题研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
 YUAN Xufeng. Research on theory of novel hybrid multiterminal HVDC system and some key problems[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2007.
- [8] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T. Offshore wind farm grid integration by VSC technology with LCC-based HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012,3(4):809-907.
- [9] 薛英林,徐政,潘武略,等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿 真[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):98-103. XUE Yinglin,XU Zheng,PAN Wulue,et al. Modeling and simulation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(9):98-103.
- [10] 赵成勇,刘文静,郭春义,等.一种适用于风电场送出的混合型 高压直流输电系统拓扑[J].电力系统自动化,2013,37(15):146-151.

ZHAO Chengyong,LIU Wenjing,GUO Chunyi,et al. Topology of a hybrid HVDC transmission system for wind power grid connection [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37 (15):146-151.

- [11] GUO Chunyi,ZHAO Chengyong. Supply of an entirely passive AC network through a double-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(11):2835-2841.
- [12] 翟冬玲,韩民晓,严稳利,等. DFIG 型海上风电混合直流送出的 控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):42-48.
 ZHAI Dongling,HAN Minxiao,YAN Wenli,et al. Control of offshore DFIG-based wind farm with hybrid HVDC transmission
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):42-48.
- [13] CHEN Xia, SUN Haishun, WEN Jinyu, et al. Intergrating wind farm to the grid using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2):965-972.
- [14] 李广凯,李庚银,梁海峰,等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术,2006,30(4):82-86.
 LI Guangkai,LI Gengyin,LIANG Haifeng, et al. Research on a novel hybrid-HVDC system[J]. Power System Technology,2006, 30(4):82-86.
- [15] 刘文静. 电压源、电流源混合型直流输电的运行机理研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
 LIU Wenjing. Research on the operating mechanism for voltagecurrent source hybrid-HVDC system[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.
- [16] 郭春义,赵成勇,Allan Montanari,等. 混合双极高压直流输电系统的特性研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(10):98-104.
 GUO Chunyi,ZHAO Chengyong,Allan Montanari,et al. Investiga-tion of hybrid bipolar HVDC system performances[J].
 Procee-dings of the CSEE,2012,32(10):98-104.
- [17] 袁旭峰,程时杰,文劲宇. 基于 CSC 和 VSC 的混合多端直流输

142

电系统及其仿真[J]. 电力系统自动化,2006,30(20):32-36,76. YUAN Xufeng,CHENG Shijie,WEN Jinyu. Simulation study for a hybrid multi-terminal HVDC system based on VSC and CSC[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(20):32-36,76.

- [18] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
 DONG Yunlong,LING Weijia,TIAN Jie, et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J].
 Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):169-175.
- [19] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6):64-73.
 SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power
- Automation Equipment,2016,36(6):64-73. [20] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中 国电力出版社,2010:14-17.

作者简介:



张 帆(1989—), 女, 河北保定人, 博士 研究生, 主要研究方向为高压直流输电与柔 性输配电技术(E-mail: zhangfan 198902@163. com):

徐 鹏(1990—),男,河南三门峡人,硕 士研究生,主要研究方向为高压直流输电与柔 性输配电技术(E-mail:xupeng1990_ncepu@

163.com);

贾秀芳(1966—),女,黑龙江大庆人,副教授,主要研究 方向为电能质量分析与评估(**E-mail**:xiufangjia@163.com);

赵成勇(1964—),男,浙江丽水人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为高压直流输电与柔性直流输电技术 (E-mail:chengyongzhao@ncepu.cn)。

Coordinated control strategy for hybrid HVDC grid

ZHANG Fan¹, XU Peng¹, JIA Xiufang¹, ZHAO Chengyong¹, WANG Feng², XU Jianzhong¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A hybrid HVDC system is studied for the interconnection of conventional LCC-HVDC(Line Commutated Converter based HVDC) system and VSC-HVDC(Voltage Source Converter based HVDC) system, which is a four-terminal bipolar hybrid HVDC grid with modular multilevel converter at its rectifier side and LCC at its inverter side. Its steady-state math model is deduced and a coordinated control strategy is designed to avoid the commutation failure at the inverter side, which coordinates the low-voltage voltage-order limiter and low-voltage power-order limiter at the rectifier side to suppress the augment of fault current and reduce the probability of commutation failure at the inverter side. The steady-state and transient performances of the studied hybrid HVDC system are simulated with PSCAD/EMTDC and the simulative results prove the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: HVDC grid; hybrid HVDC system; commutation failure; control; HVDC power transmission

(上接第 136 页 continued from page 136)

AC- and DC-side impedance models of modular multilevel converter

LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Jianwen

(Wind Power Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The impedance modeling of MMC(Modular Multilevel Converter) is the basis for analyzing the resonance and stability at AC and DC sides of MMC-based power-electronics system. While the impact of circulating current control on the AC- and DC-side impedances of MMC is considered, the DC-side and AC-side small-signal impedance analytical models of MMC are respectively derived according to its topological structure, operational features and control characteristics. A time-domain simulation model of three-phase MMC is built with MATLAB/Simulink and the AC- and DC-side small-signal impedances of MMC are calculated based on the derived analytical models, which are compared with the impedances measured by the method of small-disturbance voltage/current injection for verifying the accuracy of the analytical models. The simulative results show that, without circulating current control, the AC-side small-signal impedance has a resonance peak in low-frequency range; the resonance peak could be effectively restrained by the circulating current control.

Key words: modular multilevel converter; impedance; modeling; circulating current control; resonance