

柔直联于弱交流系统分析和仿真试验研究

杨万开¹, 张书瑀¹, 于华龙², 刘斌²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192;

2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 海淀区 100085)

System Analysis and Simulation Experimental Research of VSC-MMC HVDC Connected to AC Weak System

YANG Wankai¹, ZHANG Shuyu¹, YU Hualong², LIU Bin²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Firstly, the control performance of the MMC-HVDC transmission project connected to the weak AC system is analyzed, and the performances of such a system under different control modes are illustrated. Relying on the Yu(Chongqi city) to E(Hubei province) back-to-back MMC-HVDC project, the weak system operation mode on the north channel at Yu side is calculated and analyzed. Based on this system calculation and analysis result, the "system strength management unit access" is proposed to establish in order to ensure the stable operation of the system at Yu side under a weak system access mode, which improves the equipment availability and years of operation reliability, reduces the times of the MMC-HVDC converter station forced shutdown, a great significance for operation maintenance. A real-time simulation system based on the RTDS real-time simulation device is established and the weak system access mode under the soft control protection strategy is verified. The strategy have already been applied on the north channel of the Yu to E MMC-HVDC back-to-back project, and it has guaranteed the Yu to E back-to-back project stability operation under the weak system mode.

KEY WORDS: MMC-HVDC connection to AC weak power grid; control mode analysis; system calculation and analysis; strong/weak system switching; simulation test

摘要: 首先对柔性直流输电工程接入交流弱系统的控制性能进行了分析, 然后分析了接入弱交流电网的柔直系统在不同控制方式下的性能。依托渝鄂背靠背柔性直流工程, 对渝鄂柔直北通道渝侧弱系统方式进行了系统计算分析, 根据系统计算分析结果, 提出了构建“接入系统强度管理装置”用于保证渝侧在接入弱系统方式下能够稳定运行, 提高了设备可用率和年运行可靠性、减少直流强迫停运次数, 对运行维护具有重要意义。应用 RTDS 实时仿真装置建立了实时仿真系统, 对接入弱系统方式下柔直控制保护策略进行了验证, 该策略已经在渝鄂背靠背柔性直流工程得到了应用, 保证了渝

鄂柔直在弱系统方式下稳定运行。

关键词: 柔性直流接入弱交流电网; 控制模式分析; 系统计算分析; 强/弱系统切换; 仿真试验

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.2089

0 引言

基于电压源型换流器多电平直流输电(modular multilevel converter high voltage direct current transmission, MMC-HVDC), 即柔性直流输电, 采用全控可关断电力电子器件, 可以不需要外部电源支撑自行换相, 不会产生换相失败, 可以实现有功功率和无功功率的独立控制, 因此向交流无源网络供电, 也具备向弱交流系统供电的能力^[1-7]。我国的渝鄂背靠背柔性直流输电工程北通道由于输送容量较大, 渝(重庆)侧电网的电网强度较弱, 造成了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)与弱交流电网互联的情况。当 MMC-HVDC 连接的交流电网较弱时, 工程中普遍采用的电流控制器有可能导致柔性直流输电系统失去稳定, 并且这种趋势随着交流系统变弱更加明显^[8-12]。多数研究关注柔性直流输电的控制系统方面。文献[13-15]分析了柔直接入弱交流系统的局限性: 当交流系统短路比很低时, 柔直换流器电流矢量控制系统的 dq 轴解耦失败, 导致换流器控制系统失稳。文献[16-17]提出一种新型的功率同步控制方式, 若采用同步功率控制, 柔性直流输电的接入将不会使受端系统的稳定性受到影响^[18-19], 目前尚无实际工程应用经验。

1997 年 IEEE 发布的低短路容量直流工程的规划指导意见中指出, 交流电网强度与 2 个指标密切相关: 交流电网短路比(short circuit ratio, SCR)和

交流电网惯性时间常数。当交流电网 SCR 减小到 3 以下即可认定为弱交流电网。当柔性直流输电系统与交流电网相连时,系统控制器的稳定裕度会随着交流电网强度的下降而逐渐降低,在交流电网强度降低到一定程度后系统小信号稳定裕度已经达到极低的程度,在受到外界扰动时容易导致系统小信号失稳,对交、直流混合系统的安全稳定运行造成较大的影响。

本文研究内容依托渝鄂背靠背柔性直流工程北通道渝侧接入弱系统实际情况,首先对柔性直流接入弱系统稳定性进行了分析,然后对渝鄂背靠背柔性直流北通道进行了系统计算分析,根据系统计算结果,提出了构建“接入系统强度管理装置”,在北通道渝侧由于近区不同元件 N-2 故障或检修方式 N-1 故障时,转入弱系统方式能够稳定运行,在实验室应用实时仿真装置(real time digital simulation system, RTDS)建立了实时仿真系统,对接入弱系统方式下柔直控制保护功能进行了验证,该策略已经在渝鄂背靠背柔性直流工程得到了应用,保证了渝鄂柔直在弱系统方式下稳定运行,该措施对后续柔直工程接入弱系统的控制功能具有技术指导意义。

1 柔直接入弱系统稳定性分析

1.1 柔直交流侧稳态方程

柔性直流换流站接入系统的简化模型如图 1 所示, B2 母线为换流站网侧交流母线, 设 B2 母线电压相角为 β , 交流系统用等效电动势 $E \angle \alpha$ 和等效阻抗 $Z \angle \varphi = R + jX$ 表示。

换流站交流母线的短路容量为 S_{ac} , 直流输电系统的运行功率为 P , 短路比^[20-21](short circuit ratio, SCR)(记为 S_{SCR})表示为

$$S_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P} = \frac{U_s^2}{PZ} = \frac{1}{PZ} \quad (1)$$

式中: U_s 为换流母线的额定电压, 1.0pu; Z 、 P 分别为实际运行中换流器交流侧系统的等值阻抗和有功功率。

在图 1 中, T 为连接变压器, 原边与副边的变比为 1: k , X_T 为连接变的漏抗, X_C 为桥臂电抗, I 为从系统侧流入公共连接点(point of common

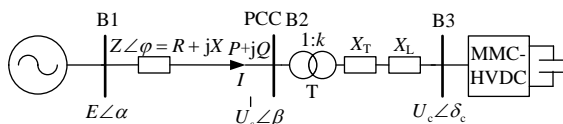


图 1 柔性直流输电连接交流系统主电路

Fig. 1 Main-circuit diagram of a MMC-HVDC converter

connected to AC systems

coupling, PCC)点的电流。

对于直流输电系统而言,文献[20]将交流系统的强弱划分为:极弱系统($S_{SCR} < 2$)、弱系统($2 < S_{SCR} < 3$)、强系统($S_{SCR} > 3$)。

根据文献[22-24]研究结果,对于图 1 所示的简化系统,交直流公共节点至 MMC 换流器交流侧节点线路主要连接有联接变压器、桥臂电抗器。由于联接变压器和桥臂电抗器的电抗值远大于其电阻值,为简化分析,可忽略电阻部分,令 $\beta = 0$, 如图 1 所示,对于 PCC 点, $P_s = P$, $Q_s = Q$, 柔直交流侧公共耦合点(point of common coupling, PCC)潮流方程:

$$\begin{cases} EU_s \cos \alpha = QX + U_s^2 \\ EU_s \sin \alpha = PX \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} kU_s U_c \sin \delta = -PX_c \\ kU_s U_c \cos \delta = k^2 U_s^2 - QX_c \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} kU_s U_c \sin \delta = -PX_c \\ kU_s U_c \cos \delta = U_c^2 + Q_c X_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 为联接变变比; $\delta = \beta - \delta_c$; $X_c = X_T + X_L$ 。

由式(2)、(3)和(4)可知,有功功率 P 跟随 δ 的变化,无功功率 Q 主要跟随 U_c 的变化。 δ 的值越小,这种关系就越明显。 U_c 的变化也同时影响有功功率 P , δ 的变化也同时影响无功功率 Q , 即直接控制 δ 和 U_c 时, P 与 Q 存在耦合现象。

1.2 定有功功率和定无功功率控制、定有功功率和定交流电压控制

根据文献[22-24]的研究结果,有下面结论:

1) 当 MMC 换流器运行在整流状态时:如果 MMC 换流器为定无功功率控制,临界短路比(critical short-circuit ratio, CSCR)的范围为 1.22~2.04;如果采用定交流电压控制, CSCR 范围为 1.35~2.04。

2) 当 MMC 换流器运行在逆变状态时,如果换流器为定无功功率控制, CSCR 范围为 0.90~1.22;如果用定交流电压控制, CSCR 范围为 1.10~1.35。

3) 当柔直换流器一侧接入系统运行在低短路比($S_{SCR} < 2.0$)时,其无功功率控制可调范围很小,不宜采用定无功功率控制,应采用定交流电压控制。

因此,在弱系统条件下,采用定有功功率和定交流电压控制方式优于定有功功率和定无功功率控制方式,有利于柔直系统的稳定运行。

1.3 定直流电压控制和定无功功率控制

在 MMC 换流器设计时,直流电压 U_d 与联接变阀侧电压的关系如下:

$$U_d = M \sqrt{3/2} U_a \quad (5)$$

$0 \leq M \leq 1$ 为 MMC 调制系数, 一般情况下, $M=0.85$, 式(5)变为

$$U_c = M \sqrt{\frac{3}{2}} U_d = 1.041 U_d \quad (6)$$

归算到联接变阀侧, 将式(6)代入式(3), 在稳态运行时, $U_s=1$, 得到下式:

$$\begin{cases} P^2 + (Q - \frac{1}{X_c/k^2})^2 = (\frac{1.041 U_d}{X_c/k})^2 \\ P^2 + Q^2 \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 在正常状态下, 换流器有功功率和无功功率的工作区域为以 $(0, 1/(X_c/k^2))$ 为原点、 $(1.041 U_d/(X_c/k))$ 为半径的四象限圆形区域。

由静态稳定 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 可以得到:

$$\frac{dQ}{dU_d} = \frac{1.0837 k^2 U_d}{Q X_c - k^2 X_c} < 0 \quad (8)$$

由式(8)可得 $Q X_c - k^2 < 0$, 继而得到:

$$Q < \frac{k^2}{X_c} \quad (9)$$

代入式(7)得到:

$$\begin{cases} Q < \frac{k^2}{X_c} \\ |P| \leq |1 - \frac{k^4}{X_c^2}| \end{cases} \quad (10)$$

式(10)的物理意义在于在柔直从强系统侧吸收的无功功率小于 k^2/X_c 时, 柔直直流电压 U_d 能够稳定。

如果 MMC 换流器接入弱系统侧采用定直流电压控制, 从式(6)可以看出, U_c 保持稳定, 由于弱系统侧 U_s 变化较大, 使得 δ 变化较大, 从式(3)可知, 有功和无功功率变化较大, 容易造成系统不稳; 如果 MMC 换流器接入强系统侧采用定直流电压控制, 而弱系统侧采用定交流电压控制, 由式(3)、(10)可知, 强系统侧可以使得弱系统侧 U_c 稳定, 而弱系统的定交流电压控制可以使得 U_s 变化稳定, 进而使得柔直系统稳定运行。

1.4 内环电流控制比例系数简析

根据文献[25]的研究结果, 电流内环控制比例系数 k_p 决定了电流跟随特性, 对系统稳定运行起到重要作用。仿真实验研究可知, k_p 越大, 换流器的负阻尼效果将越明显。为避免电流内环控制比例增益变大导致换流器负阻尼增大, 诱发系统运行不稳定, 适当减小电流内环比例参数增益, 有利于降低谐振风险。同时还要考虑到柔直系统的阶跃响应和交流故障穿越性能, 并通过仿真实验

进行验证。

仿真实验结果表明, k_p 由 0.5 降低至 0.3 后, 阶跃响应时间和超调量均小幅度增加。柔性直流单元额定功率运行, 两侧系统短路电流均为 5.5kA, 整流侧和逆变侧交流故障期间桥臂电流增加约 0.2~0.3kA。由于渝鄂工程配置了分桥臂过流暂时性闭锁保护策略, 即若连续 3 个 20μs 执行周期的桥臂电流超过 2.1kA, 该桥臂暂时性闭锁, 然后在电流下降后重新解锁。因此, k_p 参数小幅度下调虽然会小幅度影响阶跃和故障穿越时的响应特性, 但阶跃响应和故障穿越特性满足技术规范要求。选择 k_p 可调范围为 0.3~0.5, 在正常运行条件下, $k_p=0.3$ 。但是在弱系统条件下, 电流内环 k_p 由 0.3 增大为 0.4, 提高了电流内环的控制性能, 并通过仿真实验进行了验证。

通过上述分析, 当 MMC 换流器连接弱交流系统时, 柔直接入弱系统侧采用定功率和定交流电压控制模式、接入强系统侧采用定直流电压和定无功功率控制模式有利于柔直系统稳定运行。通过仿真实验研究, 在弱系统条件下, 渝鄂工程换流器电流内环控制比例系数 k_p 适当增大不会危及柔直系统的稳定运行。

2 渝鄂北通道接入交流系统强度分析

2.1 渝鄂柔直工程简介

渝鄂±420kV 直流背靠背柔性直流联网工程分为南、北 2 个通道, 南通道为施州背靠背柔直, 北通道为宜昌背靠背柔直。每个直流换流站包含 2 个换流单元, 采用单极对称拓扑结构。每个换流单元额定容量 1250MW, 南北通道 4 个换流单元总输送容量 5000MW。渝鄂工程在 2019 年投运, 渝鄂柔直工程实现川渝电网与华中电网异步互联, 对于优化电网结构、提升电力新技术应用水平具有重要意义。

2.2 渝鄂北通道接入交流系统强度分析

宜昌直流西南侧通过九盘一宜昌换流站 2 回 500kV 线路接入西南电网, 线路长度为 231km, 交流系统强度较弱, 短路电流处于较低水平。根据可研阶段校核结果, 渝鄂工程的设备与控制保护装置可以保证换流站换流母线系统侧三相短路电流在 4.7kA 及以上时可靠运行, 但近区交流线路、串补、机组等不同元件发生 N-2 故障或检修方式 N-1 故障时, 系统侧短路电流将低于可研阶段确定的边界条件。为此, 对宜昌直流西南侧接入系统的强度及弱系统适应性进行计算分析。宜昌直流渝侧电网结构如图 2 所示。

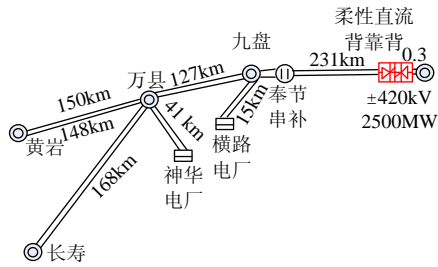


图 2 渝鄂北通道渝侧电网结构

Fig. 2 Structure diagram of Yu side for Yu to E MMC-HVDC North Channel grid

1) 横路电厂开 1 台机计算结果。

①全接线方式，发生 $N-1$ 故障。

渝侧横路电厂开 1 台机时，对于全接线及全接线 $N-1$ 方式，计算宜昌直流换流母线三相短路电流，如表 1 所示。

表 1 横路电厂开 1 机，全接线及 $N-1$ 计算结果 Table 1 Results of full connection and $N-1$ mode with one generator at Henglu power plant		
运行方式	交流系统短路电流/kA	短路比
全接线	6.958	2.531
盘宜线 $N-1$	4.855	1.767
奉节串补 $N-1$	6.077	2.212
万盘线 $N-1$	5.719	2.082
横路电厂跳机	6.183	2.251

通过系统分析计算，渝侧交流系统最低短路电流为 4.855kA，均高于 4.7kA。

②检修方式，发生 $N-1$ 故障。

横路电厂开 1 台机时，检修方式下再发生 $N-1$ 故障，计算宜昌直流换流母线三相短路电流。计算结果如表 2 所示。

表 2 横路电厂开 1 机，检修方式 $N-1$ 计算结果 Table 2 Results of $N-1$ and maintenance mode with one generator at Henglu power plant		
故障类型	交流系统短路电流/kA	短路比
串补检修+另一串补 $N-1$	5.036	1.833
盘宜线检修+另一回路串补 $N-1$	3.176	1.135
盘宜线检修+横路电厂掉机	4.381	1.595
盘宜线检修+万盘线 $N-1$	3.973	1.446
串补检修+横路电厂掉机	5.433	1.978
串补检修+万盘线 $N-1$	5.174	1.883
万盘线检修+横路电厂掉机	4.812	1.752
九盘单母线检修+另一母线跳闸	1.768	0.643
万县单母线检修+另一母线跳闸	5.956	2.168

故障后部分方式短路电流低于 4.7kA。

2) 横路电厂不开机计算结果。

①全接线方式，发生 $N-1$ 故障。

横路电厂开 0 机时，全接线下发生 $N-1$ 故障后的方式，计算宜昌直流换流母线三相短路电流，计算结果如表 3 所示。

表 3 横路电厂开 0 机，全接线下 $N-1$ 计算结果 Table 3 Results of full connection and $N-1$ mode without generator at Henglu power plant		
运行方式	交流系统短路电流/kA	短路比
全接线	6.183	2.251
盘宜线 $N-1$	4.381	1.594
奉节串补 $N-1$	5.433	1.977
万盘线 $N-1$	4.812	1.751

在横路电厂不开机的方式下，发生盘宜线 $N-1$ 故障，短路电流即不满足 4.7kA 的要求。而根据电力系统安全稳定导则，全接线下发生 $N-1$ 故障不应采取措施。因此需要对宜昌直流接入弱系统条件进行优化研究。

②检修方式，发生 $N-1$ 故障。

检修方式下发生 $N-1$ 故障的方式，计算宜昌直流换流母线三相短路电流，计算结果如表 4 所示。

表 4 横路电厂开 0 机，检修方式 $N-1$ 故障计算结果 Table 4 Results of $N-1$ and maintenance mode without generator at Henglu power plant		
故障类型	交流系统短路电流/kA	短路比
串补检修+另一串补 $N-1$	4.624	1.683
盘宜线检修+另一回路串补 $N-1$	2.908	1.058
盘宜线检修+万盘线 $N-1$	3.622	1.318
串补检修+万盘线 $N-1$	4.590	1.671
九盘单母线检修+另一母线跳闸	1.605	0.584

横路电厂开 0 机时，检修方式下再发生 $N-1$ 故障，所有故障后交流系统短路电流小于 4.7kA。

3 强/弱系统转换分析

3.1 强弱系统转换策略

通过上述系统计算分析可知，渝鄂背靠背直流输电工程渝侧交流系统在线路检修或故障情况下，会出现短路电流为 3.0、1.7kA 的弱交流系统带柔直运行的情况。根据文献[10]对柔直进行小信号模型分析，得到含锁相环(phase locked loop, PLL)情况下柔直系统的状态模型，当交流电网 SCR 小于 1.32 时，系统稳定性能会受到 PLL 的影响，当交流电网 SCR 小于 1.24 时，含 PLL 的柔直系统将不能稳定运行。此外，根据渝鄂柔直北通道渝侧系统计算结果，当系统短路电流小于 3.0kA 时，系统短路比均小于 1.24，系统处在不稳定运行状态，将闭锁直流系统。具体策略如表 5 所示。

为确保渝侧在弱系统条件下降功率稳定运行，当北通道渝侧近区线路、串补、机组在不同元件 $N-2$ 故障或检修方式 $N-1$ 故障时，就要及时发送给宜昌换流站直流控制保护系统，控制系统根据得到的信息，采取相应的控制策略。为此，为适应系统

表 5 弱系统条件下柔直控制和功率限值策略 Table 5 MMC-HVDC converter control and power limit strategy under weak system condition		
交流系统短路 电流/kA	柔直最大输送有功功率 水平/MW	内环控制 比例系数
5.5 以上	2500	0.3
4.7~5.5	1900	0.4
3.0~4.7	900	0.4
3.0 以下	闭锁	—

电网结构或运行方式发生变化而引起的柔直系统运行不稳定性，在渝侧电网中建立了“接入系统强度管理装置”，将影响系统侧短路电流元件的运行状态接入管理装置，检测近区系统方式，按照预先设定策略发出控制策略切换信号和传输功率限值。其基本原理是：在弱系统方式下，基于“接入系统管理装置”提供的切换信号，当系统进入 4.7、3.0、1.5kA 等不同方式下，对传输功率、控制性能按表 5 所示进行切换和调整。

3.2 强弱系统转换重要性分析

当系统转换为弱系统运行方式时，宜昌换流站控制保护现有控制策略在交流系统较弱、容量较低的情况下有控制不稳定、交流故障无法穿越的问题，为此，对弱交流系统特性进行研究，对控制策略进行改进优化，并进行了仿真试验，验证了其正确性。

在渝鄂柔直北通道渝侧装设“接入系统强度管理装置”，是为了保证北通道在接入弱系统方式下能够可靠地运行，不会因此而闭锁，提高了设备可用率和年运行可靠性、减少直流强迫停运次数，对运行维护具有重要意义。根据文献[26]研究结果，渝鄂柔直北通道接入弱系统后有可能会产生高频振荡，危及渝侧系统安全稳定运行，从这方面来看，“接入系统强度管理装置”是保护系统安全运行的一道防线；由于目前对柔性直流接入系统产生振荡的问题还未从根源上得到解决，因此，“接入系统强度管理装置”是目前柔直输电工程接入弱系统后能够保证系统稳定运行的一个最可靠的措施。

随着柔性直流输电技术的不断发展，在柔直工程中发生的技术问题将会不断会得到解决，例如，这几年出现的频率振荡问题等。如果渝鄂柔直工程在接入弱系统方式下出现系统不稳定运行，柔直保护将会动作，确保不会危及系统安全和设备安全。

4 弱系统控制策略优化仿真试验分析

4.1 仿真试验系统建立

建立了渝鄂柔直北通道 RTDS 实时仿真系统，

控制保护是渝鄂北通道现场的控制保护装置，对在弱系统方式下直流最大功率限制、交流系统电压控制和直流电压控制等措施进行了仿真试验研究。

渝鄂背靠背柔性直流输电系统北通道的系统参数如表 6 所示。

表 6 渝鄂背靠背柔直北通道系统参数 Table 6 Parameters of Yu-E north channel		
系统参数	取值	
	渝侧	鄂侧
额定有功功率/MW	1250	1250
交流系统电压/kV	525	525
交流系统频率/Hz	50	50
最大三相短路电流/kA	15	41.5
额定直流电压/kV	±420	±420
额定直流电流/A	1488	1488
变压器额定容量/(MV·A)	1380	1380
变压器短路阻抗/%	14	14
变压器网侧额定电压/kV	525	525
变压器阀侧额定电压/kV	437.2	437.2
子模块个数	397	397
子模块电容/μF	8000	8000
桥臂电抗/mH	140	140

4.2 最大输送功率限制试验

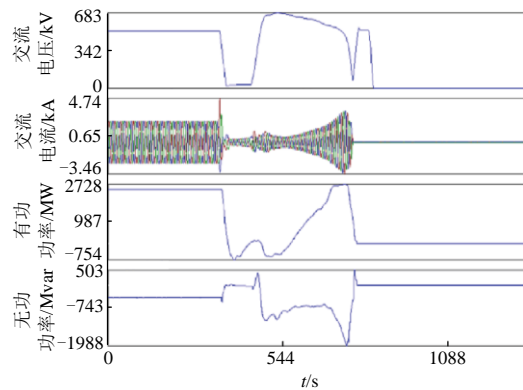
模拟三相金属性短路，故障导致渝侧交流系统短路电流 5.5kA 变为 3.0kA，鄂送渝有功功率保持 2500MW 不变，没有功率限幅，仿真结果如图 3(a)所示；鄂送渝有功功率从 2500MW 下降至 1900MW，有功功率限幅，仿真结果如图 3(b)所示。

由图 3 试验结果可知，图 3(a)在有功功率恢复的过程中，当实际有功功率超过弱系统下能够承受的功率极限后，交流电流控制失稳，持续上升，换流阀过流闭锁跳闸；图 3(b)在故障并进入弱系统后，收到系统强度判别装置的有功限幅幅值，对有功功率进行限制，故障后系统可以恢复稳定运行。

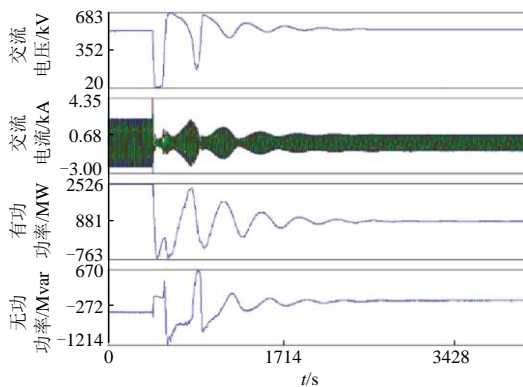
4.3 弱系统条件下交流电压控制试验

1) 根据文献[22-24]研究结果，当柔直 MMC 接入弱系统，在低短路比($S_{SCR}<2.0$)方式运行时，其无功可调节范围很小，不宜采用定无功功率控制，应采用定交流电压控制。

2) 外环控制：在收到弱系统信号后(系统强度判别装置提供)，强制渝侧无功控制为定交流电压模式，并对定交流电压控制环的 PI 参数进行调整(由 $k_p=0$, $k_i=4$ 调整为 $k_p=2$, $k_i=10$)(k_p 为控制器的比例系数, k_i 为控制器的积分系数)，有功变化时动态快速调节无功支撑电压，有利于系统电压稳定。仿真实验波形如图 4 所示。



(a) unlimited有功功率



(b) 弱系统限制有功功率

图3 弱系统限制有功功率修改前后试验对比
Fig. 3 Comparison before and after test while modification of restricted active power system

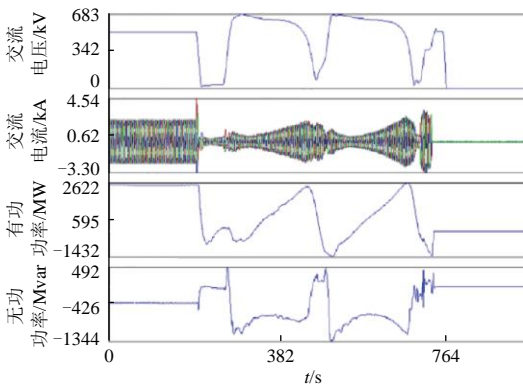
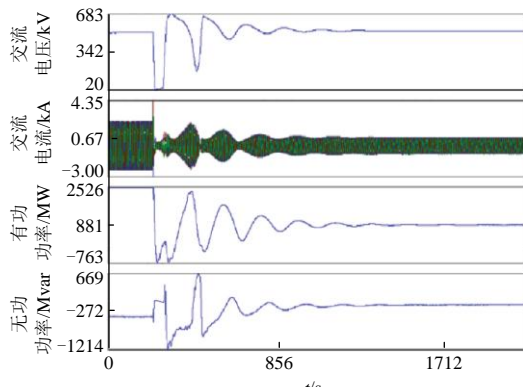
(a) 正常运行交流电压控制器PI参数($k_p=0$, $k_i=4$)(b) 弱系统条件下交流电压控制器PI参数($k_p=2$, $k_i=10$)

图4 定交流电压外环参数修改前后试验对比

Fig. 4 Test comparison before and after modification of outer loop controller parameters in AC voltage controller

由上述对比试验可知, 图 4(a)中交流电压失去稳定, 导致故障恢复时换流阀过流闭锁跳闸; 经过大量的参数适用性实验调试后, 将交流电压控制环参数修改为 $k_p=2$ 、 $k_i=10$, 交流电压环响应速度明显增快, 有利于稳定交流电压, 图 4(b)中在交流故障后系统可以恢复稳定运行。

3) 内环控制: 在保证高频振荡抑制效果的前提下, 为满足弱系统对功率调节速率的要求, 适当增大了电流内环控制的比例系数, 电流内环 k_p 由 0.3 增大为 0.4, 提高了电流内环的控制性能, 有利于弱系统下柔直控制系统的稳定。仿真实验波形如图 5 所示。

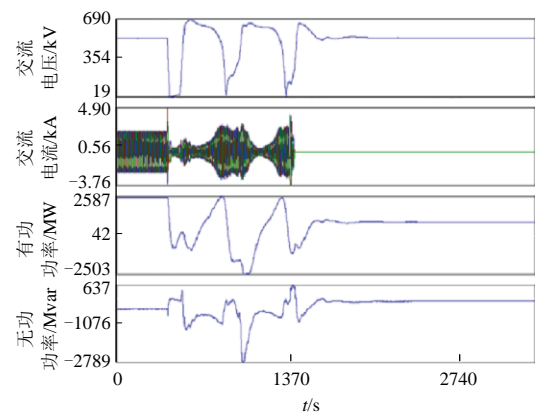
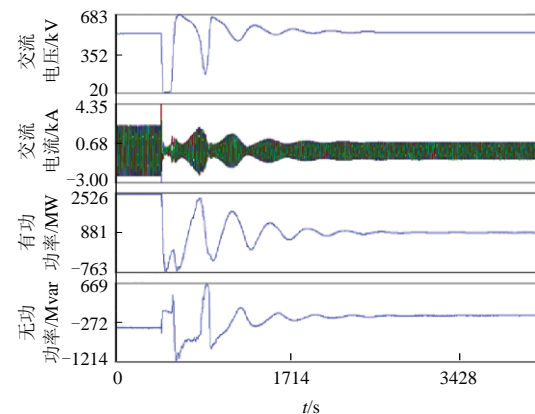
(a) 正常运行内环电流控制参数($k_p=0.3$)(b) 弱系统条件下内环电流控制参数($k_p=0.4$)

图5 内环电流控制参数修改前后试验对比

Fig. 5 Test result comparison before and after modification of inner loop current controller parameters

由上述试验可知, 图 5(a)中电流内环 k_p 较小, 内环电流跟踪外环指令值较慢, 有较严重的振荡超调, 故障恢复过程中有功、无功大幅波动且时间较长, 最终过流闭锁跳闸; 图 5(b)中电流内环 k_p 增大, 内环电流跟踪外环指令值速度加快, 振荡超调的幅度减小且收敛速度相对较快, 故障后系统可以恢复稳定运行。

4.4 弱系统条件下直流电压控制试验

在渝侧弱系统情况下, 由交流系统较强的鄂侧

采用定直流电压控制模式,有利于柔直控制系统的稳定。模拟三相金属性短路,故障导致渝侧交流系统短路电流 5.5kA 变为 3.0kA,渝送鄂 300MW,整流侧(渝侧)控制直流电压,仿真试验结果如图 6 所示。

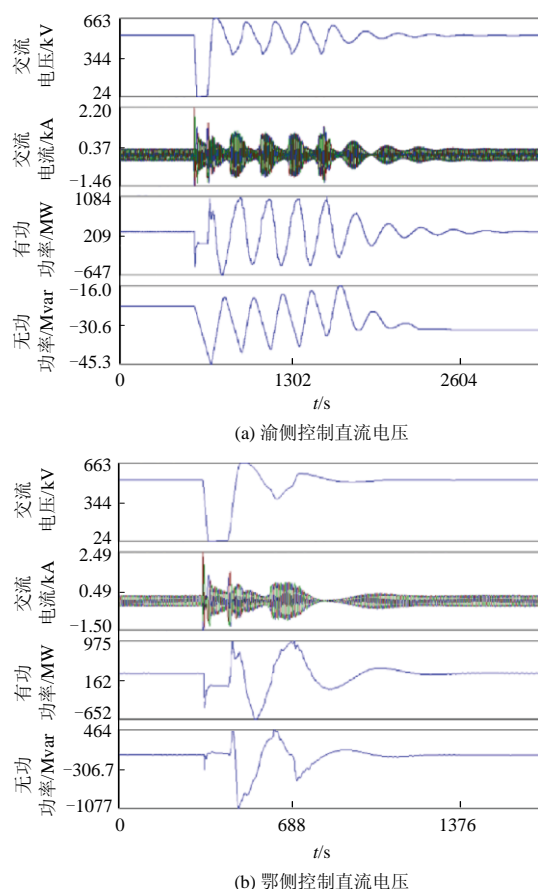


图 6 直流电压控制切换修改前后试验对比

Fig. 6 Test result comparison before and after DC voltage control transfer

由上述对比试验可知,图 6(a)渝侧控制直流电压,由于系统较弱,渝侧有功功率大幅波动,导致直流电压波动,子模块电容电压随之波动,影响了执行调制波生成电压的准确度,进一步对交流电压、电流产生不利影响,出现了多次振荡调整后,才逐渐恢复稳定;图 6(b)鄂侧控制直流电压,因为交流系统较强,交流电压相对稳定,直流电压控制稳定,故障恢复后柔直控制系统能够快速恢复稳定运行。

5 结论

对 MMC-HVDC 接入弱交流电网系统存在的系统稳定问题进行了分析,对评价系统稳定的系统短路比对系统的影响以及它们之间的关系进行了分析,对弱系统方式下的控制保护适应性进行了研究,提出了控制策略优化措施,并通过 RTDS 实时仿真试验进行了验证,得到如下结论:

1) MMC 换流器连接弱交流系统时,柔直接入弱系统侧采用定功率和定交流电压控制模式、接入强系统侧采用定直流电压和定无功功率控制模式有利于柔直系统稳定运行。

2) 在弱系统条件下,适当增大柔直换流器电流内环控制比例系数 k_p 不会危及柔直系统的稳定运行。

3) 通过优化 MMC-HVDC 接入交流弱系统后的控制策略和参数,提出了接入系统强度管理装置进行强/弱切换,保证了 MMC-HVDC 在弱系统方式下能够稳定运行,并在 RTDS 实时仿真装置建立的实时仿真系统进行了验证,这些措施已经应用于渝鄂柔直北通道,确保了渝鄂柔直北通道在渝侧弱系统方式下的稳定运行。

参考文献

- [1] 王旭斌,杜文娟,王海风.弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1593-1604.
WANG Xubin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Stability analysis of grid-tied VSC systems under weak connection conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1593-1604(in Chinese).
- [2] 杨洁,刘开培,王东旭.向无源网络供电的双端柔性直流输电系统小信号稳定性分析[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2400-2408.
YANG Jie, LIU Kaipei, WANG Dongxu. Small signal stability analysis of VSC-HVSC applied to passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2400-2408(in Chinese).
- [3] 余瑜,刘开培,杨洁,等.向无源网络供电的多端混合直流输电系统小信号模型及解耦控制[J].中国电机工程学报,2016,36(1):76-86.
YU Yu, LIU Kaipei, YANG Jie, et al. Small-signal modeling and decoupling control of hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 76-86(in Chinese).
- [4] 黄云辉,宋泽凡,唐金锐,等.连接弱电网的并网变换器直流电压时间尺度稳定器的设计与分析[J].电工技术学报,2018,33(增刊1):185-192.
HUANG Yunhui, SONG Zefan, TANG Jinrui, et al. Design and analysis of DC-link voltage stabilizer for voltage source converter as connected to weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 185-192(in Chinese).
- [5] 马晓倩,何埏,谢莉,等. ± 500 kV 同塔三回柔性直流输电线路的电磁环境[J].电网技术,2020,44(5):1978-1984.
MA Xiaoqian, HE Kun, XIE Li, et al. Study on electromagnetic environment of ± 500 kV triple-circuit flexible DC transmission line on same tower[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1978-1984(in Chinese).
- [6] 王聪博,贾科,毕天姝,等.基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电网线路保护[J].电网技术,2019,43(10):3823-3831.
WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC Distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3831(in Chinese).
- [7] 黎上强,乔颖,徐曼,等.新能源柔直汇集系统的分层多目标安全裕度优化[J].电网技术,2020,44(12):4513-4520.
LI Shangqiang, QIAO Ying, XU Man, et al. Hierarchical

- multi-objective safety margin optimization of renewable energy island collecting delivery system by VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4513-4520(in Chinese).
- [8] HARNEFORS L, BONGIORNO M, LUNDBERG S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [9] ZHOU J Z, GOLE A M. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics[C]//10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, 2012: 1-6.
- [10] ZHOU J Z, DING Hui, FAN Shengtao, et al. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [11] XU Ling, FAN Lingling. Impedance-based resonance analysis in a VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2209-2216.
- [12] KONISHI H, TAKAHASHI C, KISHIBE H, et al. A consideration of stable operating power limits in VSC-HVDC systems[C]//Seventh International Conference on AC-DC Power Transmission, London, UK, 2001: 102-106.
- [13] ZHANG L D. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to weak AC systems[D]. Stockholm, Sweden: KTH, 2010.
- [14] ZHANG L D, HARFORS L, NEE H P. Modeling and control of VSC-HVDC links connected to island systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 783-793.
- [15] ZHANG L D, HARFORS L, NEE H P. Interconnection of two very weak AC systems by VSC-HVDC links using power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 344-355.
- [16] ZHANG L D, HARNEFORS L, NEE H P. Power-synchronization control of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 809-820.
- [17] 陆韶琦, 徐政. 采用功率同步控制的 MMC-HVDC 功率极限分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1868-1876.
LU Shaoqi, XU Zheng. Analysis of the maximum power flow in power synchronization control based MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1868-1876(in Chinese).
- [18] ZHANG L D, NEE H P, HARNEFORS L. Analysis of stability limitations of a VSC-HVDC link using power-synchronization control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1326-1337.
- [19] ASHABANI M, MOHAMED Y. Integrating VSCs to weak grids by nonlinear power damping controller with self-synchronization capability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 805-814.
- [20] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.
XU Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems Part I: HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16(in Chinese).
- [21] 周勤勇, 赵珊珊, 刘增训, 等. 高比例新能源电力系统稳定拐点释义[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2979-2986.
ZHOU Qinyong, ZHAO Shanshan, LIU Zengxun, et al. Discussion on inflection point for power system stability with high proportion of new energy generation[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2979-2986(in Chinese).
- [22] 刘昇, 徐政. 联于弱交流系统的 VSC-HVDC 稳定运行区域研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 133-143.
LIU Sheng, XU Zheng. Study on stable operating region of VSC-HVDC connected to weak AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 133-143(in Chinese).
- [23] 邵冰冰, 赵书强, 裴继坤, 等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3344-3352.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, PEI Jikun, et al. Subsynchronous oscillation characteristic analysis of grid-connected DDWFs via VSC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3344-3352(in Chinese).
- [24] 李生虎, 孙婷婷, 黄杰杰, 等. DFIG 与 VSC-HVDC 协同参与电网调频的动态潮流算法[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4433-4439.
LI Shenghu, SUN Tingting, HUANG Jiejie, et al. Dynamic power flow algorithm with coordinated regulation of power system frequency with DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4433-4439(in Chinese).
- [25] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 157-164.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200813.1102.002.html>.
GUO Xianshan, LIU Bin, MEI Hongming, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei Back-to-Back HVDC project of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 157-164(in Chinese).
- [26] 侯延琦, 刘崇茹, 王宇, 等. 柔性直流输电系统高频振荡抑制策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2020: 1-11[2021-02-23].
<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201084>.
HOU Yanqi, LIU Chongru, WANG Yu, et al. Research on the suppression strategy of high-frequency resonance for MMC-HVDC [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2020, 1-11[2021-02-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201084>(in Chinese).



杨万开

在线出版日期: 2021-02-24.

收稿日期: 2020-12-01.

作者简介:

杨万开(1960), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 中国电机工程学会会士, 长期从事高压直流输电技术研究工作, E-mail: wankai@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)