

DOI: 10.7667/PSPC170605

基于改进控制策略的 MMC-HVDC 运行特性研究

孙黎¹, 胡峰², 穆钢²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 模块化多电平换流器(MMC)作为一种新型拓扑结构, 在高压直流输电系统研究中备受瞩目。但其内部控制系统中, 存在抗干扰能力低, 输出不稳定等问题。根据上述问题, 在原有控制策略的基础上, 对系统级控制进行改进。该系统不仅能够实现有功、无功独立控制和直流电压稳定控制, 且减小了扰动振荡幅度和故障后恢复时间, 有效地改善了系统暂稳态特性。在 Matlab/Simulink 环境下, 搭建改进的 MMC-HVDC 两端有源系统, 对改进前后的控制策略进行对比仿真分析。结果验证了理论的正确性与有效性。

关键词: 直流; 模块化多电平换流器; 控制策略; 仿真; 运行特性

Investigation of MMC-HVDC operation performance based on improved control strategy

SUN Li¹, HU Feng², MU Gang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Modular Multilevel Converter (MMC), as a new type of topology, has attracted much attention in the research on HVDC system. However, there are some problems such as low anti-jamming capability and unstable output in their internal control systems. According to these problems, this paper improves the systemic control on the basis of original control strategy. The improved control strategy not only can realize independent control of active power and reactive power as well as stable control of the DC voltage, but also can reduce the oscillation amplitude and cut down the recovery time, as a consequence the transient and steady-state performance are improved efficaciously. This paper establishes MMC-HVDC two AC systems and conducts the contrastive simulation analyses between the improved control strategies and original strategies in the Matlab/Simulink. The results verify the correctness and validity of the theory.

This work is supported by the National key research and development program of China (No. 2017YFB0902004).

Key words: DC; MMC; control strategy; simulation; operation performance

0 引言

随着高压直流输电技术的飞速发展, 基于全控型电压源换流器的高压直流输电系统(Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)因其独立控制有功无功、能量双向传输、适应于各类输电场合, 且不存在换相失败等诸多优势, 被广泛应用于大城市负荷中心、海上钻井平台、海岛供电和新能源等直流输电工程^[1-4]。

其中, MMC 作为 VSC 的一种新型拓扑结构, 因其具有开关频率低、波形质量高和可拓展等优点, 具有良好的发展前景^[5-6], 是未来直流输电工程发展

的重要对象。MMC 换流器由多个脉宽调制控制信号的子模块串联而成, 任何一个子模块运行参数发生变化, 都会影响到整个波形的输出。因此, 与 VSC-HVDC 相比, 稳态运行下的 MMC 控制策略, 除根据交流侧数学模型推导出的基本控制策略之外, 还需附加子模块电容电压均衡控制以及环流抑制控制^[7]。控制策略的复杂性以及多样性使得 MMC-HVDC 系统对于各个环节的控制要求颇为严格, 一旦某个环节控制力薄弱, 必然会对其他环节造成影响。

VSC-HVDC 系统采用的控制策略主要以文献[8]所设计的电流内环控制以及电压外环控制为主, 对于两电平、三电平的 VSC-HVDC 系统来说, 由于其在交流侧额外增加了大容量的滤波器且在直流

侧增加了支撑电容, 使得输出稳定性大大提高, 因此传统的控制策略能够满足其正常运行要求。但对于结构上增加了均压环节的 MMC-HVDC 系统来说, 原有的 VSC 控制策略则不够有效。因此, 需对控制策略加以改进, 对 MMC-HVDC 系统中出现的异常工况以及小干扰波动进行有效地抑制, 减小故障振荡幅度及故障后系统恢复时间。

本文根据上述对 MMC 控制器的要求, 对原有的 VSC-HVDC 控制策略进行改进, 在功率外环控制中加入了新的控制元素, 限制振荡幅度, 减少干扰恢复时间, 以提高控制系统的稳定性及抗干扰性。在 Matlab/Simulink 环境下搭建基于改进控制策略的 MMC-HVDC 两端有源系统模型, 对该模型进行稳态阶段与暂态阶段的仿真, 对改进前后该系统的运行特性进行对比分析, 结果验证了改进控制策略的正确性与有效性。

1 MMC-HVDC 系统介绍

本文以两端 MMC-HVDC 输电系统为例, 拓扑结构如图 1 所示。其中: u_{s1}, u_{s2} 分别为逆变器与整流器交流侧交流电压; i_{s1}, i_{s2} 分别为逆变器与整流器交流侧电流; P_1, P_2 分别为送端与受端传输的有功功率; T_1, T_2 分别为逆变侧与整流侧变压器; U_{dc}, I_{dc} 分别为直流侧电压和电流。

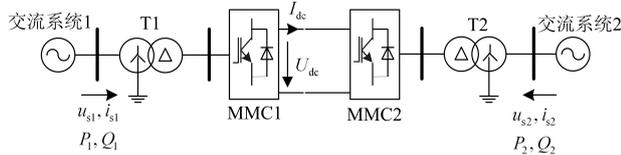


图 1 MMC-HVDC 系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of MMC-HVDC

MMC 变流器拓扑结构如图 2 所示。图 2 中: $i_{sk} (k = a, b, c)$ 为 MMC 交流侧出口处三相电流; $i_{kp} (k = a, b, c)$ 与 $i_{kn} (k = a, b, c)$ 分别为三相上、下桥臂的电流; $u_{kp} (k = a, b, c)$ 与 $u_{kn} (k = a, b, c)$ 分别为上、下桥臂子模块叠加输出的等效电压; U_{dc} 为 MMC 直流侧直流电压; U_{SM} 为单个子模块输出电压。

由图 2 可知, 三相 MMC 由 6 个结构相同的级联桥臂组成。每个级联桥臂由若干个子模块 (Sub-Module, SM) 以及一个电抗器 L 串联而成。其中, 一个 SM 子模块由 2 个绝缘栅双极晶体管 (Insulated-gate Bipolar Transistor, IGBT) V_1, V_2 , 2 个续流二极管 (VD_1, VD_2) 以及一个电容 C 构成。通过控制子模块的开关状态, 在直流侧可以维持稳

定的直流电压, 在交流侧输出波形质量较高的交流电压^[9-11]。

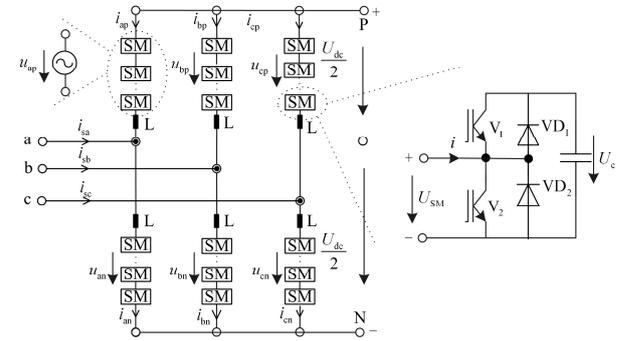


图 2 MMC 拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of the MMC

2 MMC-HVDC 系统控制策略

2.1 MMC-HVDC 控制器结构

目前, MMC-HVDC 系统中普遍采用的系统级控制分为两大类: 有功类控制与无功类控制。有功类控制包括恒有功功率控制、恒直流电压控制和定频率控制; 无功类控制包括恒无功功率控制与恒交流电压控制。对于 MMC-HVDC 两端有源系统来说, 为了维持直流电压稳定, 本文在逆变器侧采用恒直流电压控制^[12-13]。

除功率外环控制, MMC-HVDC 系统两侧控制器基本相同, 由外到内分别由外环控制器、内环电流控制器、阀级控制器构成, 如图 3 所示。其中, 下标 ref 表示参考值, 未带下标的为测量值。本文对控制策略进行的改进主要是针对外环控制器参数进行改进控制, 故后文主要对外环控制器的结构进行分析研究。

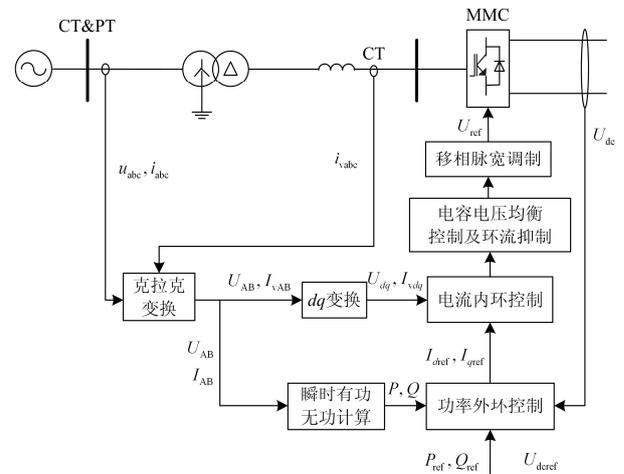


图 3 MMC-HVDC 控制结构框图

Fig. 3 Control system of a MMC-HVDC

2.2 外环控制器设计

目前, 国内一般采用的外环控制器控制较为简单, 如图 4 所示, 其中: P_{ref} 、 Q_{ref} 、 U_{dcref} 分别为有功功率、无功功率与直流电压的参考值; P_{meas} 、 Q_{meas} 、 U_{dcmeas} 分别为有功功率、无功功率与直流电压的测量值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为交流电流 dq 轴分量参考值。

将实际测量值 P_{meas} 、 Q_{meas} 、 U_{dcmeas} 与参考值 P_{ref} 、 Q_{ref} 、 U_{dcref} 进行比较, 得到不平衡量, 进而通过 PI 控制器转换成作为内环电流控制器的输入量 i_{dref} 、 i_{qref} , 控制类型属于开环控制。

传统的外环控制器虽然在一定程度上缩短了控制反应的时间, 但其结构对于异常工况或扰动, 不能够准确控制, 从而使得系统的可靠性以及抗干扰性得不到保证^[14-15]。

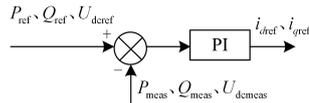


图 4 传统外环控制器

Fig. 4 Original outer loop controller

本文针对以上问题, 采用了改进的功率外环控制, 具体结构如图 5 所示。改进 1 是针对原有外环控制器的改进, 改进 2 是针对大扰动如暂态故障等异常工况设计的附加控制。

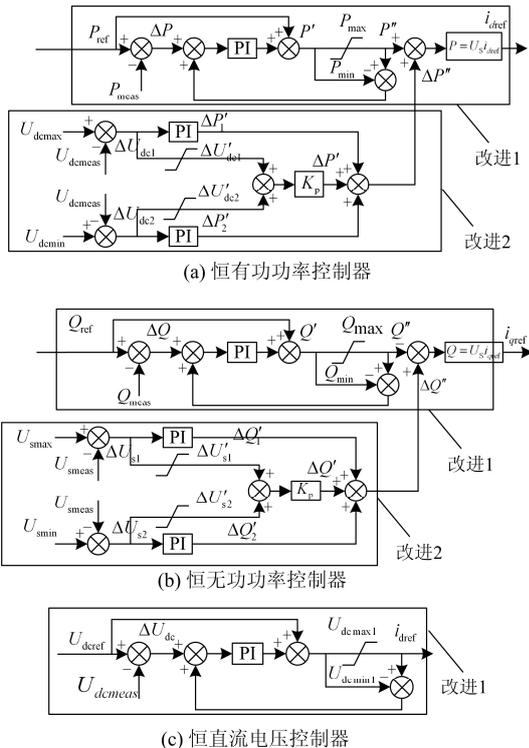


图 5 改进外环控制器

Fig. 5 Improved external loop controller

改进后的恒有功功率控制器相比于传统外环恒有功功率控制器, 增加了闭环控制, 并加入了暂态故障控制, 如图 5(a)改进 1、改进 2 所示。其中, U_{dcmax} 、 U_{dcmin} 为直流电压允许上下限, 一般允许电压波动在额定值的 $\pm 5\%$ 以内, 设置直流上限为 1.05 p.u., 下限为 0.95 p.u.; P_{max} 、 P_{min} 为有功功率限幅环节上下限, 分别为 1 p.u. 和 -1 p.u.。

首先, 对改进 1 的控制原理进行具体分析。 P_{ref} 与 P_{meas} 相比得出不平衡量 ΔP , ΔP 经过 PI 环节输出 P' , P' 通过限幅环节输出 P'' , 稳态运行下 $P' = P''$, 当受到干扰时, P' 可能高于或者低于限值, 超出限值部分的直接输出限值, 未超出限值的部分正常输出, 此时 $P' \neq P''$, 则通过加法器将 $P' - P''$ 的差值负反馈到输入侧, 与 ΔP 相比, 通过 PI 控制器消除扰动, 从而维持 i_{dref} 稳定的输出。

其次, 对改进 2 的控制原理进行具体分析。将 U_{dcmax} 和 U_{dcmin} 分别与 U_{dcmeas} 作差, 得出 ΔU_{dc1} 与 ΔU_{dc2} , 一方面, ΔU_{dc1} 与 ΔU_{dc2} 经过 PI 控制器分别输出 $\Delta P'_1$ 与 $\Delta P'_2$; 另一方面, ΔU_{dc1} 经过限幅环节(最大输出 0, 最小输出 -1)输出 $\Delta U'_{dc1}$, ΔU_{dc2} 经过限幅环节(最大输出 1, 最小输出 0)输出 $\Delta U'_{dc2}$, $\Delta U'_{dc1}$ 与 $\Delta U'_{dc2}$ 相加经比例环节输出 $\Delta P'$ 。最后 $\Delta P'_1$ 、 $\Delta P'_2$ 、 $\Delta P'$ 三者相加输出有功功率不平衡量 $\Delta P''$ 给改进 1, 以调整 i_{dref} 的取值。

以逆变器交流侧发生暂态故障为例, 由于受端传输有功功率能力降低, 而送端传输的有功功率不变, 多余的有功功率使得直流电压大幅增加, 因此, 采用改进 2 对直流电压进行控制, 一旦出现直流电压过高, 经过 PI 控制环节输出负的有功功率和改进 1 输出的有功功率相加, 从而降低了受端有功功率的输出, 最终使直流电压的升高得到抑制。

此外, 改进 2 用于暂态故障下直流电压的抑制, 而传统的控制器则可以通过恒有功以及恒直流电压换流站的相互转换达到控制暂态故障的效果, 两者相比, 本文附加的改进 2 属于直接控制, 控制较为迅速, 调节较为方便。同时, 由于引入了附加控制, 使得控制的复杂度与原有的外环控制器相比有所增加, 不过, 附加控制结构简单, 在暂态故障的控制方面, 相比于恒有功以及恒直流电压换流站的相互转换控制的复杂度来说, 反而降低了控制的复杂度。此外, 附加控制对抑制直流电压波动的范围没有传统暂态控制的范围大, 因此, 在暂态故障特别严重时, 需要用恒有功与恒直流相互转换代替改进 2 进行控制。

改进后的恒无功功率控制器与改进的恒有功功

率控制器类似, 同样增加了闭环控制, 并加入了暂态故障控制, 如图 5(b)改进 1、改进 2 所示。其中, U_{\max} 、 U_{\min} 为交流电压允许的上下限, 限值与直流电压限值一致; Q_{\max} 、 Q_{\min} 为无功功率限幅环节上下限, 分别为 0.5 p.u.和-0.5 p.u.。

对图 5(a)与图 5(b)进行比较可得: 改进的恒无功功率控制器与恒有功功率控制器结构基本一致。表明其具体控制原理与恒有功功率控制器一致, 只是控制量分别由有功功率和直流电压转换成了无功功率与交流电压, 功能也转换成用于抑制交流电压的波动, 因此, 本文不再赘述。

本文采用的恒直流电压控制器如图 5(c)所示, 其中, $U_{\text{dcm}1}$ 、 $U_{\text{dcmin}1}$ 为直流电压限幅环节上下限, 分别为 1.1 p.u.和-1.1 p.u.。由于其本身就是针对直流电压的控制, 所以没有附加控制即改进 2, 而改进 1 的功能也与上述两例控制器的功能类似, 主要用于抑制异常状况下直流电压的波动。

2.3 外环控制器的适用范围

本文采用的改进外环控制同样适用于 VSC-HVDC 系统, 但是由于 VSC-HVDC 控制结构简单, 且相比于 MMC-HVDC 来说, 在系统侧加装了滤波器以及支撑电容, 运行十分可靠, 因此, 在 VSC-HVDC 系统中主要考虑控制系统的响应速度。此时, 将系统级的外环控制由开环变为闭环时, 增加了控制响应的的时间, 反而会对控制器的性能不利。

对于 MMC-HVDC 来说, 主要将系统运行的可靠性作为重点。为实现子模块电容电压平衡, MMC-HVDC 系统中, 加入了电容电压平衡控制以及环流抑制控制, 这大大增加了系统的复杂性, 牺牲了控制响应的速动性。控制系统越复杂, 对于各个环节的控制要求就越高, 一旦某一环节控制薄弱出现问题, 必然会对整个控制系统造成影响。因此, 考虑到系统运行可靠性的问题, 将外环控制由开环变为闭环, 虽然在一定程度上增加了控制响应时间, 但是在仿真结果中可以看出, 虽然控制响应时间增加了, 但是干扰恢复的时间却缩短了, 这证明外环控制对干扰进行了有效的控制, 比起开环控制, 对干扰的控制更加容易、更加可靠。

综合以上所述, 本文所采用的改进外环控制更适用于控制结构较为复杂的 MMC-HVDC 系统。

3 MMC-HVDC 系统运行特性仿真分析

3.1 仿真模型概述

为了验证所建立 MMC-HVDC 系统模型的正确性以及所采用的改进控制策略的有效性, 利用 Matlab/Simulink 平台, 搭建基于两端有源 MMC-

HVDC 系统, 对仿真结果进行分析, 比较 MMC-HVDC 系统在采用改进控制策略前后稳态阶段和暂态阶段的运行特性。

本文设计的 MMC-HVDC 两端有源系统, 逆变侧采用恒直流电压以及恒无功功率控制, 整流侧采用恒有功功率以及恒无功功率控制。此外, MMC-HVDC 系统的阀级控制采用载波移相正弦脉宽调制(Carrier Phase-Shifted SPWM, CPS-SPWM), 其余部分包括电容电压均衡控制以及环流抑制控制均建立在 CPS-SPWM 基础上。

针对图 1 所示的 MMC-HVDC 系统模型, 额定容量为 200 MVA, 电源侧额定电压为 230 kV, 直流额定电压为 ± 100 kV, 以电缆作为直流输电线路, 长 80 km, 电缆电阻值为 $0.0139 \Omega/\text{km}$, 电抗值为 $0.159 \text{ mH}/\text{km}$ 。其余基本参数见表 1。

表 1 MMC-HVDC 仿真系统基本参数

Table 1 Basic parameters of MMC-HVDC simulation system

	整流侧系统	逆变侧系统
换流变压器变比	230×0.915/100 kV	230×1.015/100 kV
换流变压器电阻值/p.u.	0.005	0.005
换流变压器电抗值/p.u.	0.15	0.15
模块电容值/ μF	70	70
桥臂电抗值/mF	8	8

3.2 稳态阶段对比研究

为了验证本文所采用改进控制策略的优越性, 特设计了两套 MMC-HVDC 系统, 其中一套采用原有控制策略, 另外一套采用改进控制策略。对以上两套 MMC-HVDC 系统进行稳态仿真, 研究其在不同工况以及小干扰状态下的运行特性, 对两者在各状态下的运行状况进行比较, 分析改进控制策略的稳定性及抗干扰性。稳态阶段的控制详情见表 2。

表 2 稳态阶段控制详情

Table 2 Steady state stage simulation control details

时间/s	动作详情
1.5~1.64	整流侧交流电压下降 0.1 p.u.
2.0	有功参考功率减小 0.1 p.u.
2.5	无功参考功率减小 0.1 p.u.
3	逆变器侧直流参考电压减小 0.05 p.u.

按照表 2 给出的控制详情, 对 MMC-HVDC 系统进行稳态仿真, 仿真结果如图 6 所示。

首先, 根据采样获得的具体数据, 分析改进前后系统控制量的波动程度, 详情如表 3 所示。

根据表 3 可以看出, 改进后各被控量的标准差均小于改进前, 说明改进后系统的波动小于改进前波动, 改进后波形拟合效果优于改进前拟合效果。

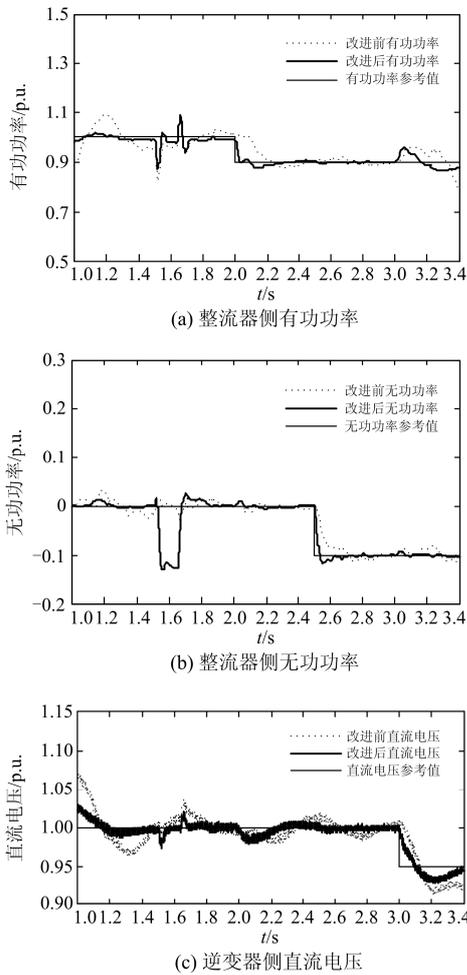


图 6 稳态阶段波形

Fig. 6 Steady state stage waveform

表 3 改进前后标准差对比

Table 3 Comparison of standard deviation before and after improvement

	改进前标准差	改进后标准差
有功功率	0.049 0	0.022 6
无功功率	0.014 0	0.005 5
直流电压	0.017 3	0.006 9

其次，根据图 6 具体分析研究改进前后系统的变化，具体如下所述。

1) 有功功率方面。如图 6(a)所示，1.5~1.64 s 送端系统交流侧电压下降时，改进之前有功功率发生幅度约 0.18 p.u.的振荡，振荡时间为 0.3 s 左右，改进之后，有功功率发生幅度约 0.1 p.u.的振荡，振荡时间为 0.2 s 左右。2 s 时，运行工况改变，有功功率参考值降低 0.1 p.u.，改进之前，有功功率实际值跟踪参考值速度较慢，约 0.2 s 才到达稳定，改进后有功功率实际值及时跟随参考值变化，两者几乎

重合。2.5 s 时，无功功率参考值减小 0.1 p.u.，无论改进前还是改进后，有功都未变化。3 s 时，直流电压降低 0.05 p.u.，改进前有功功率变化较大，恢复时间较长，改进后系统经过 0.2 s 即达到稳定。上述结果表明，采用改进控制策略，对有功功率，系统振荡的幅度及恢复时间等控制均有了很大的改善。

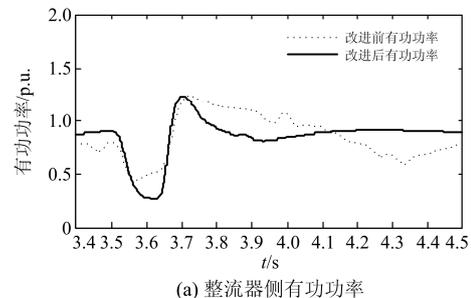
2) 无功功率方面。如图 6(b)所示，1.5~1.64 s 之间交流电压降低时，改进前，控制系统并没有采取附加控制进行抑制，仅依靠自身的调节机制，因此振荡十分频繁。而在采用改进控制策略之后，无功功率在改进控制策略的作用下，下降 0.1 p.u.，从而保证了有功功率及直流电压的稳定。2 s 时有功功率参考值变化，对无功功率没有影响。2.5 s 时无功功率参考值降低 0.1 p.u.，改进之前，无功功率实际值跟踪参考值的速度较慢，约 0.3 s 才到达稳定，而改进之后无功功率实际值及时跟随参考值变化，两者几乎重合。2.5 s 直流电压变化对于无功功率没有影响。以上对比表明改进控制策略在无功功率控制方面效果显著。

3) 直流电压方面。如图 6(c)所示，交流电压降低时，改进前，直流电压波动较大，改进后，波动幅度与时间都有了改善。有功功率参考值减小时，直流电压均有所降低，但是改进后直流电压无论是波动幅度还是恢复时间都比改进前有了改善。无功功率减小对于直流电压无影响。直流电压降低时，改进前，直流电压实际值跟踪速度较慢，而且达到稳定时间超过 0.4 s，改进后，实际值能够及时跟踪参考值。可见采用改进控制策略后，直流电压的控制效果十分明显。

通过对改进控制策略前后仿真结果的对比可知：改进后系统不仅能够对有功功率和无功功率进行解耦控制，还能够降低振荡幅度，缩短振荡时间，可靠地控制系统状态，增强系统的稳定性和抗干扰性。

3.3 暂态阶段对比研究

在逆变器交流侧设置三相短路模块，在 3.5 s 时投入，在 3.62 s 时切除。具体仿真结果如图 7。



(a) 整流器侧有功功率

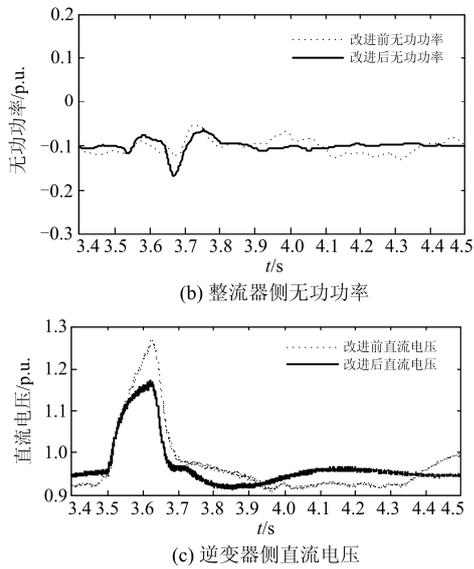


图 7 暂态阶段波形

Fig. 7 Transient stage waveform

分析图 7(a)可得, 逆变器侧发生三相故障时, 改进前整流器侧传输有功为 0.5 p.u. , 逆变器侧交流电压降为零, 有功需求为 0 , 此时, 整流器侧传输有功大于逆变器侧有功的需求, 两侧有功功率的不平衡将导致直流电压大幅升高, 最终对电力电子器件造成损害。采取改进的控制策略后, 整流器侧有功功率在控制器的作用下, 输出减少至 0.25 p.u. , 降低了有功不平衡的危害。故障被切除后, 改进前的有功功率总是在稳定值上下波动, 而改进后的有功功率约 0.3 s 后即恢复到稳定状态。

分析如图 7(c)可得, 发生三相故障时, 在直流电压控制器作用下, 直流电压的最大幅值被控制在 1.16 p.u. , 比改进前直流电压幅值小约 0.1 p.u. , 故障切除后, 改进后的直流电压恢复效果明显优于改进前的直流电压。

通过仿真结果的对比可以看出, 本文采用的改进控制策略在故障期间能够及时减少整流器侧有功功率的传输, 将直流电压控制在允许范围内, 从而保证了电力电子器件的安全。在故障切除后, 改进的系统很快恢复到稳定状态且无明显波动, 波动程度以及故障恢复时间远小于改进之前故障恢复的时间, 能够及时地恢复到稳定状态。

4 结论

本文在 MMC-HVDC 系统中采用了一套改进的控制策略, 解决了以往控制策略抗干扰性低, 控制不稳定的问题。在 Matlab/Simulink 平台上建立了 MMC-HVDC 两端有源系统仿真模型, 对采用改进

控制策略前后的稳态阶段以及暂态阶段的运行特性进行了对比研究, 得到的结论如下所述。

1) 对于稳态情况而言, 虽然外环控制由开环改进成闭环, 在控制响应速度上有了一定程度延时, 但是由于控制效果显著, 反而使系统对于干扰的抑制能力得以提升, 在系统异常工况时能够减小振荡幅度, 缩短扰动后系统恢复时间, 具有良好的稳定性及抗干扰性。

2) 对于暂态情况而言, 改进控制策略能够在未启动有功直流换流站相互转换控制模式的前提下, 及时地降低整流侧有功功率的传输, 从而有效地抑制了直流电压升高的幅度, 对电力电子器件具有很好的保护效果。此外, 故障恢复时间也得到明显的改善。

3) MMC-HVDC 系统采用改进后的控制策略, 虽然增加了少许的控制复杂度, 降低了控制策略的反应速度, 但能够更高效地对直流系统进行控制, 为后续研究交直流系统运行特性提供更有效的平台基础。

参考文献

- [1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14. TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电的发展技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81. LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 77-81.
- [3] 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.
- [4] 马成廉, 潘文明, 姚天亮, 等. VSC-HVDC 在交流电网非故障时的控制策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2015, 35(6): 26-32. MA Chenglian, PAN Wenming, YAO Tianliang, et al. Research on control strategy of VSC-HVDC in AC power grid[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2015, 35(6): 26-32.
- [5] 朱玲, 符晓巍, 胡晓波, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 系统的模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 1-8.

- ZHU Ling, FU Xiaowei, HU Xiaobo, et al. Model predictive control of modular multilevel converter for HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 1-8.
- [6] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [7] 杨晓峰, 郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 59-65, 178.
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65, 178.
- [8] FELDMAN R, TOMASINI M, AMANKWAH E, et al. A hybrid modular multilevel voltage source converter for HVDC power transmission[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1577-1588.
- [9] Md Habibur Rahman, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of large partitioned MTDC Networks Using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [10] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 1-10.
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [11] 邢长达, 郭家虎, 朱成杰, 等. MMC 控制系统中子模块控制器的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 114-121.
XING Changda, GUO Jiahu, ZHU Chengjie, et al. Design of the sub-module controller of the MMC control system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 114-121.
- [12] 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.
- [13] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [14] 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: 17-19.
- [15] 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: 30-36.

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-06-07

作者简介:

孙黎(1983—),女,通信作者,博士生,研究方向高压直流输电运行与控制; E-mail: sunlinedu@163.com

胡峰(1993—),男,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电技术。E-mail: 13804428276@163.com

(编辑 葛艳娜)