



## 大规模风电接入的特高压混合级联直流系统送端无功协调控制策略

李昊 仝义 赵成勇 王志冰 迟永宁

### A Reactive Power Coordinated Control Strategy for Sending-end of Hybrid Cascaded UHVDC System With Grid-connected Large-scale Wind Power

LI Hao, TONG Yi, ZHAO Chengyong, WANG Zhibing, CHI Yongning

引用本文:

李昊, 仝义, 赵成勇, 等. 大规模风电接入的特高压混合级联直流系统送端无功协调控制策略[J]. *现代电力*, 2023, 40(2): 210–218. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0276

LI Hao, TONG Yi, ZHAO Chengyong, et al. A Reactive Power Coordinated Control Strategy for Sending–end of Hybrid Cascaded UHVDC System With Grid–connected Large–scale Wind Power[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(2): 210–218. DOI: 10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0276

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0276>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 带混合储能的光伏并网系统功率协调控制策略研究

Research on Power Coordination Control Strategy of Photovoltaic Grid-connected System with Hybrid Energy Storage  
*现代电力*. 2019, 36(1): 37–44 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I1/37>

#### 计及多类型交易的新能源与火电实时协调控制策略

Real-Time Coordinated Control Strategy for New Energy and Thermal Power That Takes Into Account Spot Transactions  
*现代电力*. 2020, 37(1): 59–65 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2018.1452>

#### 级联式电力电子变压器的电压平衡控制策略

Voltage Balance Control Strategy for a Cascaded H–Bridge Converter–based Power Electronic Transformer  
*现代电力*. 2020, 37(1): 98–103 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2019.0114>

#### 青南新能源集中送出地区动态无功补偿方案对比研究

Comparative Study on Dynamic Reactive Power Compensation Scheme in the Concentrated Delivery Area of New Energy in Southern Qinghai  
*现代电力*. 2021, 38(1): 87–93 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2020.0348>

#### 一种基于模块化多电平换流器的多端高压直流输电系统协调控制方法

A Coordination Control Method for Multi-terminal High Voltage DC System Based on Modular Multilevel Converter  
*现代电力*. 2023, 40(1): 100–107 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0241>

#### 计及机组有功与无功耦合特性的集群新能源电站无功优化

Reactive Power Optimization of Clustered New Energy Power Stations Considering Active and Reactive Coupling Characteristics of Generating Units  
*现代电力*. 2022, 39(4): 422–430 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007–2322.2021.0159>

# 大规模风电接入的特高压混合级联直流系统 送端无功协调控制策略

李昊<sup>1</sup>, 仝义<sup>1</sup>, 赵成勇<sup>1</sup>, 王志冰<sup>2</sup>, 迟永宁<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市海淀区100192)

## A Reactive Power Coordinated Control Strategy for Sending-end of Hybrid Cascaded UHVDC System With Grid-connected Large-scale Wind Power

LI Hao<sup>1</sup>, TONG Yi<sup>1</sup>, ZHAO Chengyong<sup>1</sup>, WANG Zhibing<sup>2</sup>, CHI Yongning<sup>2</sup>

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

Haidian District, Beijing 100192, China)

**摘要:** 随着新能源发电占比的不断提高, 特高压直流输电系统的送端电网强度变弱, 送端交流系统可能存在电压质量较差的问题。为提高送端弱交流系统的电压质量, 基于大规模风电接入的特高压混合级联直流系统, 提出了滤波器与模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)协调参与送端电网调压的无功协调控制策略。分别分析了该级联直流系统的运行特性、滤波器的无功控制原理以及 MMC 在不同运行工况下影响其无功支撑能力的因素。针对 MMC 在过载的运行工况下对弱交流系统无功支撑能力较弱的问题, 提出了一种 MMC 直流电压自适应控制策略, 根据 MMC 传输的有功功率调整其直流电压, 以扩大 MMC 的无功功率极限。仿真算例表明, 所提无功协调控制策略能够有效支撑送端弱交流系统的电压, 提高送端交流系统的电压质量。

**关键词:** 新能源; 特高压混合级联直流系统; MMC; 无功功率协调; 电压

**Abstract:** With the continued increase of the proportion of renewable energy generation, the strength of the sending power grid in UHVDC transmission system is weakened and poor voltage quality might exist in AC system at the sending end. To improve the voltage quality of the weak AC system located at the sending end, based on the hybrid cascaded UHVDC system with grid-connected large-scale wind power, a reactive power coordinated control strategy, in which the filter and the modular multilevel converter (abbr. MMC) were coordinately participated into the voltage regulation of power grid sending end, was proposed. The operating characteristic of this cascaded DC system, the principle of reactive power control of the filter and

the factors impacting the reactive power supporting ability of MMC under different operating condition were respectively analyzed. In allusion to the insufficient reactive power supporting capacity of MMC for weak AC system under the overloaded operating condition, an adaptive DC voltage control strategy for MMC, which could adjust DC voltage of MMC according to the active power transmitted by MMC to expand the reactive power limit of MMC, was put forward. Results of simulation example show that the proposed reactive power coordinated control strategy can effectively support the voltage of weak AC system located at the sending end and the voltage quality of the AC system can be also improved.

**Keywords:** renewable power; hybrid cascaded UHVDC system; MMC; reactive power coordinated; voltage

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0276

## 0 引言

随着化石能源的不断消耗和环境问题的日益严峻, 风能也成为最具发展前景的清洁能源之一。我国的风电等新能源基地主要分布于西部地区, 而负荷中心位于中、东部地区。利用高压直流输电系统将风电、火电打捆远距离送出成为一种重要选择<sup>[1-3]</sup>。

然而, 大规模新能源经远距离输电线接入电网后, 交流电网的强度相对变弱, 交流系统存在电压质量较差的问题。传统的电网换相换流器直流输电(line commutated converter based high voltage

direct current, LCC-HVDC) 工程中, 主要通过投切滤波器来进行无功调节, 但滤波器调节的不连续性及投切过程中带来的无功突变也恶化了交流系统的电压质量。而基于电压源型换流器的柔性直流输电 (voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC) 由于具有有功无功解耦的特点, 可以通过调节无功功率的输出来改善弱交流系统的电压质量。但与传统直流输电相比, 存在损耗大、经济性差等问题。

混合直流输电充分结合了 LCC 与 VSC 的优点, 在学术界已经开展了广泛的研究<sup>[4]</sup>。文献<sup>[5]</sup>指出混合级联系统具有直流故障穿越能力; 文献<sup>[6]</sup>研究了混联直流系统的直流故障特性及恢复策略; 文献<sup>[7]</sup>提出一种不同规模的新能源基地分层接入的混合级联直流系统结构, 该系统送端采用 LCC 级联两个 MMC 的结构, 受端采用 MMC 串联的结构, 并研究了该系统的基本控制策略。目前, 受端采用 LCC 级联 3 个 MMC 结构的白鹤滩特高压混合级联直流输电工程正在建设中。根据电路原理分析可知, 送、受端均采用 LCC 串联多个 MMC 的混联直流系统是混合直流输电系统中最复杂的一种类型, 该系统直流侧的 LCC 换流站与多个 MMC 换流站存在直接的电气联系, LCC 与 MMC 之间的电气耦合特性直接影响了 MMC 对交流系统的无功支撑能力。如何充分利用混合直流系统的运行优势来改善交流系统的电压质量成为亟待解决的问题。

针对 LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 相互协调改善交流系统的电压质量, 有许多文献进行了论述: 文献<sup>[8]</sup>通过计算等效短路比来评估高压直流输电的电压稳定性, 并提出了在交流电网发生故障时, VSC-HVDC 为交流电网电压提供最大无功支撑的控制策略; 文献<sup>[9-11]</sup>提出利用柔直换流器发出的无功功率以抑制换相失败的控制策略。但这些文献只考虑了在暂态情况下 LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 的协调控制策略, 并未提出稳态无功协调控制策略, 且不适用于复杂的混合级联直流系统调节电压。文献<sup>[12]</sup>提出了无功协调两级控制模块, LCC-HVDC 配置的滤波器与 VSC-HVDC 协调配合达到抑制暂态过电压和低电压的目的。文献<sup>[13]</sup>提出了在 MMC 换流站中将定交流电压和定无功功率控制级联的控制策略, 并在定交流电压控制中加入桥臂电流辅助控制环节与故障清

除后进行积分清零的控制, 兼顾了稳态和暂态调节电压的需求。这些控制策略均未解决在混合级联直流系统中若 MMC 处于过载工况时, 因容量限制而几乎没有为交流系统提供无功支撑能力的问题。

综上所述, 本文所采用的混合级联直流系统参与电压调节的过程中存在如下困难:

- 1) 送端交流系统接入大规模新能源后, 短路比减小, 电压波动更频繁, 对交流电压的控制更为迫切。
- 2) 混合级联直流系统直流侧为 LCC 串联两个并联的 MMC, 直流电压协调方面存在困难。
- 3) 混合级联直流系统中 LCC 的直流电流等于两个并联的 MMC 的直流电流之和, 两个 MMC 之间的有功分配必然会影响混联直流系统参与调压的能力。

本文基于直流侧采用 LCC 串联两个并联的 MMC 结构的混合级联直流系统, 提出混联直流系统配置的滤波器组与 MMC 换流站参与送端交流系统电压调节的无功协调控制策略。首先分析了该混联直流系统的运行特性; 其次, 分析了滤波器组的无功控制原理与 MMC 在不同工况下影响其无功支撑能力的因素, 针对 MMC 换流器在过载工况下对弱交流系统无功支撑能力较弱的问题, 提出 MMC 直流电压自适应控制策略, 根据 MMC 传输的有功功率调整其直流电压, 以扩大 MMC 的无功功率极限; 最后, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建相应的模型验证所提控制策略的有效性。

## 1 特高压混合级联直流系统

### 1.1 特高压混合级联直流系统的拓扑结构

混合直流输电系统的单极拓扑结构如图 1 所示。该系统采用端间对称、极间对称结构, 其中每端的单极都由一个 LCC 串联两个并联的 MMC。在整流侧一个极的两个 MMC 换流站中, 一个 MMC 换流站 (命名为 MMC2) 连接到孤岛风电场, 另一个 MMC 换流站 (命名为 MMC1) 与 LCC 换流站 (命名为 LCC1) 共同连接至送端交流系统。该混合级联直流系统具有建设成本低、运行损耗较低、输电灵活性较强的特点<sup>[7]</sup>, 同时, 该系统复杂的结构也使得直流侧 LCC 与 MMC 之间的电压

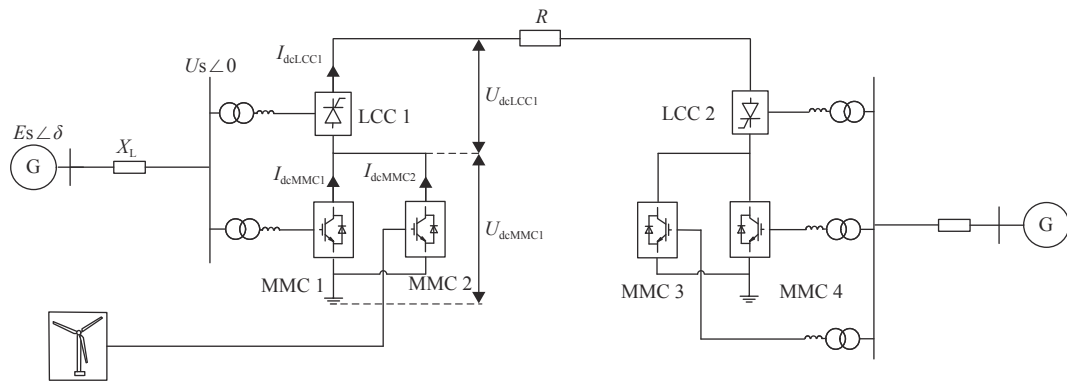


图1 特高压混合级联直流系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of hybrid cascaded UHVDC system

协调存在一定的困难，两个并联的MMC之间的功率分配也影响了该系统的无功调节能力。特高压混合级联系统的参数如表1所示。

### 1.2 混合级联直流系统的基本控制策略及运行特性

混合级联直流系统的基本控制策略如表2所示。LCC1采用12脉动换流器， $N_1$ 为整流侧单极LCC1换流站中的6脉动换流器数， $U_s$ 为换流变压器阀侧空载线电压有效值， $T$ 为换流变压器变比，LCC1的直流电压为 $U_{dcLCC1}$ 、直流电流为 $I_{dcLCC1}$ 、每相换相电抗为 $X_r$ 、功率因数为 $\cos\phi$ 、触发延迟角为 $\alpha$ 、换相重叠角为 $\mu$ ，MMC1和MMC2的直流电流分别为 $I_{dcMMC1}$ 、 $I_{dcMMC2}$ ，传输的直流功率分别为 $P_{MMC1}$ 、 $P_{MMC2}$ ，孤岛风电场发出功率为 $P_{dfig}$ ，混联直流系统送端数学模型如公式(1)–(5)所示：

$$U_{dcLCC1} = N_1 \left( \frac{3\sqrt{2}U_s}{\pi T} \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{dcLCC1} \right) \quad (1)$$

$$\cos\varphi = \cos\alpha - \frac{X_r I_{dcLCC1} T}{\sqrt{2}U_1} \quad (2)$$

$$I_{dcLCC1} = I_{dcMMC1} + I_{dcMMC2} \quad (3)$$

$$P_{MMC1} = U_{dcMMC1} I_{dcLCC1} - P_{MMC2} \quad (4)$$

$$P_{MMC2} = P_{dfig} = U_{dcMMC1} I_{dcMMC2} \quad (5)$$

在额定运行工况下，直流系统的直流电流为5 kA，MMC1直流电压为400 kV，孤岛风电场输出的有功功率为1000 MW，火电机组仅向送端LCC1和MMC1换流站提供有功功率，孤岛风电场向MMC2换流站提供有功功率。根据式(3)，混合级联直流系统直流侧的LCC1与两个MMC换流站存在直接的电气联系，即流过LCC1的电流等于流过MMC1与MMC2的电流之和。LCC1

采用定直流电流控制，MMC2连接孤岛风电场，这意味着当MMC2传输的功率较低时，MMC1传输的有功功率会很高，MMC1会运行在过载的工况下。由于MMC1视在容量(MMC1与MMC2视在容量均为1100 MVA)的限制，此时MMC1无法为交流系统提供较强的无功支撑。

表1 特高压混合级联直流系统主要参数  
Table 1 Main parameters of hybrid cascaded UHVDC system

系统参数	数值
额定容量/MW	4000
直流电压/kV	$\pm 800$
直流电流/kA	5
送端LCC换流站变比	525/178.65
送端MMC换流站变比	525/220.574
LCC直流电流/kA	5
MMC直流电压/kV	400
每相桥臂子模块个数	200
子模块电容电压/kV	2
火电机组额定容量/MW	3000
孤岛风电场额定容量/MW	1000

表2 特高压混合级联直流系统基本控制策略  
Table 2 Basic control strategy of hybrid cascaded UHVDC system

换流站	额定容量/MW	控制策略
LCC1	2000	定直流电流控制
送端站		
MMC1	1000	定直流电压控制定无功功率控制
MMC2	1000	定VF控制
LCC2	2000	定直流电压控制
受端站		
MMC3	1000	定直流电压控制定无功功率控制
MMC4	1000	定有功功率控制定无功功率控制

## 2 LCC-HVDC 配置的滤波器组的无功控制及 MMC1 换流站无功支撑能力分析

### 2.1 LCC-HVDC 配置的滤波器组的无功控制

实际直流工程中的无功控制主要是通过对其配置的滤波器组等无功单元的投切来实现的。

LCC-HVDC 所配置的滤波器组的基本无功控制主要包括绝对最小滤波器组控制、最小滤波器组控制、极限电压控制、最大无功功率限制以及交流滤波器组的定无功或定电压控制。其中，绝对最小滤波器组控制、最小滤波器组控制、极限电压控制和最大无功功率限制主要是为了交直流输电系统的正常运行设置的限定条件；交流滤波器组定无功和定电压控制在实际运行中只能选择一个启动<sup>[14]</sup>。在弱交流系统中，无功的变化更容易引起交流母线电压的波动，所以交流滤波器一般选择定电压控制<sup>[15]</sup>。上述无功控制的优先级和功能力如表 3 所示。

表 3 滤波器组的无功控制策略

优先级	无功控制	功能
1	绝对最小滤波器组控制	保护滤波器安全运行，防止过负荷运行
2	极限电压控制	保证换流母线电压在所设置的最大值和最小值之间
3	最大无功功率限制	防止交直流系统交换无功功率时出现过电压
4	最小滤波器组控制	在满足交直流谐波特性的情况下，控制投入数量最少和型号合适的滤波器组
5	定无功控制	控制运行中交直流系统交换的无功功率在规定的范围内
	定电压控制	控制换流母线电压在规定的范围内

为了获得更好的无功控制效果，无功控制中还包括一些辅助功能，如 QPC 功能、Gamma Kick 功能等，但这些辅助功能均需要改变 LCC-HVDC 的运行触发角来平衡系统内的无功功率，大大降低了直流系统运行的经济性<sup>[15]</sup>。另外，滤波器组的定无功控制与定电压控制由于存在死区与延时，滤波器也存在一定的固有动作时间，因此通过滤波器组调节电压响应速度慢，投切瞬间还会存在无功波动与电压频繁变化的问题。

### 2.2 MMC1 换流站无功功率极限分析

在本拓扑结构中，MMC1 采用定直流电压控制和定无功功率控制，在稳态运行情况下，MMC1 定无功功率控制的无功功率参考值设为 0；

MMC2 采用 V-F 控制，该站的两个控制自由度用尽，不具备为交流系统提供无功支撑的能力。

本文以图 2 所示的单端 MMC 换流站模型为例，分析 MMC1 在不同的运行工况下可以提供的无功功率的极限<sup>[16]</sup>。

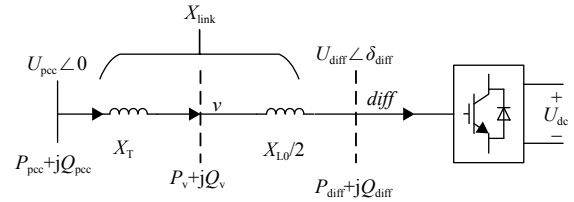


图 2 单端 MMC 换流站模型

Fig. 2 The model of single-ended MMC convertor station

图 2 中： $U_{pcc}$  为交流侧母线相电压折算至阀侧后的值； $X_T$  为换流变压器的电抗； $X_{L0}$  为桥臂电抗； $U_{dc}$  为直流侧电压； $P_{pcc}$ 、 $Q_{pcc}$  为交流系统流入换流站的有功功率和无功功率； $P_{diff}$ 、 $Q_{diff}$  为换流器出口的有功功率和无功功率。在  $dq$  同步旋转坐标系下， $d$  轴以电网电压向量定位，即  $U_{sq}=0$ ，相电压幅值  $U_{pcc}=U_{sd}$ 。将 MMC 交流侧出口处  $v$  点作为研究对象，换流器交流侧电压方程为

$$\dot{U}_{pcc} = \frac{P_v/3 - jQ_v/3}{U_{vd} - jU_{vq}}(jX_T) + \dot{U}_v \quad (6)$$

其中， $v$  点的电压为

$$\dot{U}_v = U_{vd} + jU_{vq} \quad (7)$$

整理得

$$\begin{cases} U_{vd}^2 + U_{vq}^2 + (Q_v/3)X_T - U_{pcc}U_{vd} = 0 \\ (P_v/3)X_T + U_{pcc}U_{vq} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

当方程组 (8) 有实数解时，说明 MMC 在该工况下可以稳定运行。

同时，MMC 子模块中包含 IGBT，反并联二极管和子模块电容等器件，这些器件都有一定的容量约束，使得 MMC 整体的容量有一定的限制，MMC 的 PQ 运行点必须在此视在容量  $S_N$  中取得。

$$P_v^2 + Q_v^2 \leq S_N^2 \quad (9)$$

在 MMC 中，调制比定义为调制波相电压幅值除以  $U_{dc}/2$ ，在如图 2 所示的单端 MMC 柔性直流输电系统中，将  $diff$  点的相电压幅值除以  $U_{dc}/2$  定义为 MMC 换流器的调制比。为了降低输出电压的谐波畸变率，根据理论研究和实际工程中的经验，一般将 MMC 的调制比  $m$  限制在 0 到 1 之内<sup>[16]</sup>。即

$$0 \leq m \leq 1 \quad (10)$$

其中

$$m = \frac{\sqrt{2}U_{diff}}{U_{dc}/2} \tag{11}$$

$$U_{diff} = \sqrt{(U_{pcc} + X_{link}I_{vq})^2 + (X_{link}I_{vd})^2} \tag{12}$$

$$X_{link} = X_T + X_{L0}/2 \tag{13}$$

当交流侧电流过大时也会对 MMC 子模块产生不利的影 响，严重时 会烧坏 MMC，因此，交流侧的电流应有一定的限制，即

$$\sqrt{I_{vd}^2 + I_{vq}^2} \leq I_{VN} \tag{14}$$

有了以上约束，可以分析 MMC 的无功功率运行极限。

图 3 为该单端 MMC 换流站在  $U_{pcc}$  为额定值情况下的 PQ 运行范围，当  $P_{pcc} > 993.3$  MW 时，即 MMC 运行在额定功率附近时，MMC 可提供的最大无功功率主要由换流器的容量限制，此时

$$Q_{min1} = 3I^2X_T - \sqrt{S_N^2 - P_{pcc}^2} \tag{15}$$

当  $0 < P_{pcc} < 993.3$  MW 时，即 MMC 运行在非额定工况下，MMC 可提供的最大无功功率主要由换流器的调制比限制，此时

$$Q_{min2} = \frac{3U_{pcc}}{X_{link}} \left( U_{pcc} - \sqrt{\left( \frac{U_{dc}}{2\sqrt{2}} \right)^2 - \left( X_{link} \frac{P_{pcc}}{3U_{pcc}} \right)^2} \right) \tag{16}$$

MMC 最多可以吸收的无功功率由交流侧额定电流限制，即

$$Q_{max} = \sqrt{(3U_{pcc}I_N)^2 - P_{pcc}^2} \tag{17}$$

综上，当混合直流系统中的 MMC1 在过载的工况下，由于其容量的限制，可以为交流系统提供的无功功率十分有限。

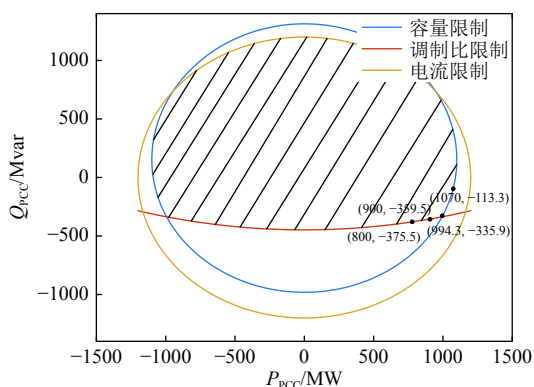


图 3 MMC 换流站 PQ 运行范围

Fig. 3 The PQ operating range of MMC station

### 3 大规模新能源分层接入的混合级联直流系统无功协调控制策略

由上述分析可知，LCC-HVDC 配置的滤波器可调节容量大，但其调节速度慢，且无功功率不能平滑调节，而 MMC 响应速度快，但调节容量有限，因此，为了改善由于大规模新能源接入送端电网带来的电压质量问题，基于 MMC 无功调节速度快，LCC-HVDC 滤波器可调节容量大的特性，设计了如图 4 所示的无功协调控制策略，可减少滤波器的频繁投切，改善交流系统的电压质量。

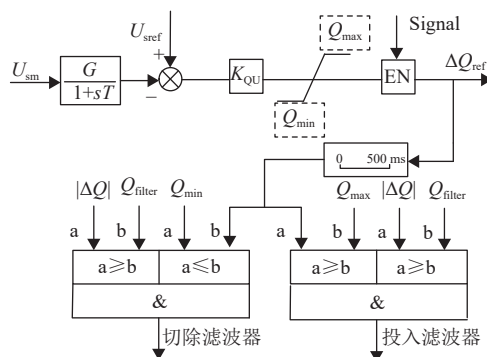


图 4 无功协调控制策略

Fig. 4 Coordinated control strategy of reactive power

图 4 中： $U_{sm}$  为送端交流母线的测量值； $U_{sref}$  为送端交流母线的设定参考值； $Q_{max}$ 、 $Q_{min}$  为 MMC1 可以为送端电网母线提供的最大无功功率值与最小无功功率值，EN 为策略投入的使能控制； $\Delta Q_{ref}$  为 MMC1 换流站外环无功功率控制环节的附加无功功率补偿值，其值为正表示 MMC1 发出无功功率，其值为负表示 MMC1 吸收无功功率； $\Delta Q$  为某时刻送端交流电网的无功功率缺额， $Q_{filter}$  表示单组滤波器的无功功率容量。用一阶惯性环节来模拟电压及相关参数的测量及通信延时，取比例常数  $G=1.0$ ，时间常数  $T=0.02$  s。

该控制策略具体实现方式分析如下：

如图 5 所示， $U'_{smH}$ 、 $U'_{smL}$  分别为交流母线电压变化率的最大、最小值。策略投入使能控制通过监测换流站所连接的交流电网母线电压的变化率来判断交流系统电压的波动情况，根据交流系统的实际情况，可以设置不同的电压一次导数阈值。当交流母线变化率超过其设定的阈值范围时，控制器发出信号，协调控制策略投入使用。

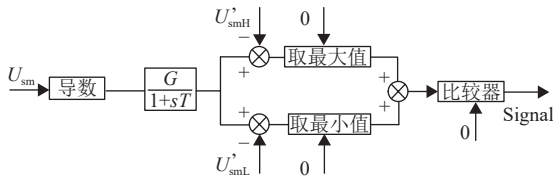


图 5 使能控制  
Fig. 5 Enable control

图 4 的无功协调控制策略分为两级，第一级利用  $UQ$  下垂控制，计算此时交流系统所需的无功功率大小并补偿至 MMC1 换流站外环定无功功率控制：在图 1 中，忽略线路上的电阻， $X_L$  为交流系统等效电抗， $E_s$  为交流系统戴维南等效端电压，流向交流母线处的无功功率值为：

$$Q = \frac{U_s(U_s - E_s \cos \delta)}{X_L} \quad (18)$$

发生扰动时， $U_s$  的变化量  $\Delta U_s$ ，无功功率的变化量为  $\Delta Q$ ，功角变化量为  $\Delta \delta$ ，式 (18) 改写为

$$Q + \Delta Q = \frac{(U_s + \Delta U_s)(U_s + \Delta U_s)}{X_L} - \frac{(U_s + \Delta U_s)E_s \cos(\delta + \Delta \delta)}{X_L} \quad (19)$$

在稳态时， $\delta$ 、 $\Delta \delta$  很小，近似认为  $\sin \delta \approx \delta$ ， $\cos \delta \approx 1$ ，式 (19)(18) 相减并简化为

$$\Delta Q = \frac{2U_s - E_s}{X_L} \Delta U_s \quad (20)$$

$$K_{QU} = \frac{2U_s - E_s}{X_L} \quad (21)$$

由于 MMC 无功功率调节速度快，此时 MMC1 会迅速为交流系统提供无功支撑，但是当 MMC1 处于过载状态时，受限于 MMC1 的容量，MMC1 几乎没有为母线电压进行无功支撑的能力。在 MMC1 过载的工况下，此时决定 MMC1 无功功率极限的因素为换流器容量，若适当减小 MMC1 传输的有功功率，可以增大无功功率的极限。例如在混合级联系统外送额定功率时，MMC1 传输的有功功率为 1100 MW，MMC2 传输的有功功率为 900 MW，此时 MMC1 不具备为交流母线提供无功支撑的能力，若能将 MMC1 传输的有功功率降低 100 MW，此时 MMC1 可以利用的最大无功容量扩大为 458.26 Mvar。

因此为了提高 MMC1 换流站可提供的最大无功功率极限，提出适当降低 MMC1 直流电压参考值的电压自适应控制策略，该电压自适应控制策略应用于 MMC1 换流站的有功类控制外环，可以使 MMC1 传输的部分有功功率转移至 LCC1，

扩展了 MMC1 的无功功率的运行极限。

孤岛风电场发出的有功功率  $P_{dfig}$  在 min 级尺度内波动量占额定容量的 2%~5%，且多个风电场输出叠加波动量会进一步降低<sup>[17]</sup>，为了简化分析，忽略风电场的 min 级波动量，将  $P_{dfig}$  可以视为定值。根据式 (4)(5)，MMC1 传输的有功功率变化量与直流电压变化量呈线性关系，有

$$\Delta P_{MMC1} = I_{dcLCC1} \Delta U_{dcMMC1} \quad (22)$$

故将直流电压参考值  $U_{dcMMC1}$  整定为

$$U_{dcMMC1} = \begin{cases} 400 \text{kV}, P_{MMC1} \leq 1000 \text{MW} \\ 400 - \frac{P_{MMC1} - 1000}{I_{dcLCC1}} \text{kV}, \\ 1000 \text{MW} \leq P_{MMC1} \leq 1100 \text{MW} \end{cases} \quad (23)$$

$$380 \text{kV} \leq U_{dcMMC1} \leq 400 \text{kV} \quad (24)$$

当 MMC1 传输的有功功率低于 1000 MW 时，由于这时决定 MMC1 可利用无功容量的主要因素为调制比，此时通过降低 MMC1 传输的有功功率来提高无功功率极限的控制策略经济性较差，如图 3 所示，当 MMC1 传输的有功功率从 900 MW 降低至 800 MW 时，MMC1 的最大无功容量仅增大了 16 Mvar。

该控制策略的第二级为 LCC-HVDC 配置的滤波器动作，使电压恢复至设定值附近。当 MMC1 换流站为交流母线提供无功支撑后，LCC-HVDC 配置的滤波器开始动作，为了减小滤波器组动作与 MMC1 的无功调节相互影响，在滤波器开始动作之前设置 500 ms 的延时。此时若 MMC1 提供的无功功率  $\Delta Q_{ref}$  与 MMC1 的无功极限值  $Q_{max}/Q_{min}$  相等，且此时交流系统的无功功率缺额  $\Delta Q$  的绝对值大于单组滤波器的无功容量  $Q_{filter}$ ，滤波器进行投切控制。

## 4 仿真实验

在 PSCAD / EMTDC 中搭建如图 1 所示的特高压混合级联直流系统。混合级联直流系统的送端短路比为 3 时，第一级控制中 QU 下垂控制的比例系数经计算得 16.495，在第二级控制中单组滤波器的无功容量  $Q_{filter}$  设为 180 Mvar。为了验证本文提出大规模新能源接入的混合级联直流系统的无功协调控制策略在不同工况下的有效性，设置 3 个案例来模拟系统极端情况下的无功不平衡状况，分别为：

1) 送端系统投入负荷，母线电压降低，分别

对比滤波器无功控制策略,无功协调控制策略,改进无功协调控制策略在该工况下的调压效果。

2) 送端系统切除负荷,母线电压升高,分别对比滤波器无功控制策略,无功协调控制策略,改进无功协调控制策略在该工况下的调压效果。

3) 孤岛风电场功率波动,验证改进无功协调控制策略的抑制电压波动效果。

其中,改进无功协调控制策略与无功协调控制策略相比,MMC1定直流电压控制附加了自适应电压控制策略。

#### 4.1 算例 1: 母线电压降低工况

设第 8 s 时,送端系统投入  $450+j300\text{MVA}$  的负荷,当送端换流站采常规无功控制策略、无功协调控制策略和改进无功协调控制策略时,对比分析送端系统母线电压,送端换流站滤波器动作情况,MMC1 换流站传输的有功功率和无功功率,以及 MMC1 直流电压的情况,仿真结果如图 6 所示。

当送端电网投入大负荷后,送端系统与混合级联直流系统送端站之间的线路上流过的功率增大,电压降落增大,导致母线电压降低,电压最低值为 0.941 pu。如图 6 所示,在滤波器无功控制策略中,考虑滤波器投切的动作延时,需要投入 4 组滤波器,电压最低值为 0.941 pu;当采用无功协调控制策略之后,由于 MMC1 过载,可提供的最大无功容量为 135 Mvar 左右,因此为将交流电压恢复至额定值附近,仍需投入 4 组滤波器,电压最低值没有改善;当采用改进无功协调控制策略之后,MMC1 的直流电压根据传输功率自适应调整,将 MMC1 的部分功率转移至 LCC1,此时 MMC1 的直流电压降至 0.95 pu 附近,MMC1 可提供的最大无功功率为 240 Mvar 左右,MMC1 无功功率极限提升了约 77.8%,暂态电压最低值为 0.948 pu,之后只需投入 2 组滤波器即可将母线电压恢复至额定值。

#### 4.2 算例 2: 母线电压升高工况

设第 8 s 时,送端系统切除  $450+j300\text{MVA}$  的负荷,当送端换流站采用滤波器无功控制策略、无功协调控制策略和改进无功协调控制策略时,对比分析送端系统母线电压,送端换流站滤波器动作情况,MMC1 换流站传输的有功功率和无功功率,以及 MMC1 直流电压的情况,仿真结果如图 7 所示。

当送端系统切除部分负荷之后,输电线路上的功率减少,混联直流系统送端站过补偿,交流

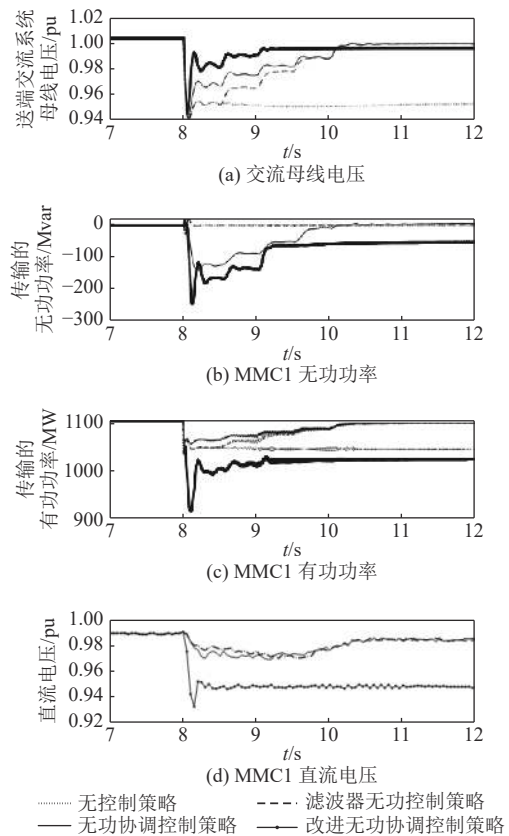


图 6 低电压工况下混联直流系统仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of hybrid cascaded UHVDC system under low voltage operating condition

母线电压升高。如图 7 所示,若不投入任何无功控制策略,电压最高上升至 1.059 pu;当送端站采用滤波器无功控制策略时,需要切除 4 组滤波器来减少无功输出,由于滤波器动作较慢,暂时过电压情况没有改善;当采用无功协调控制策略时,负荷切除后 MMC1 迅速吸收无功功率 150.7 Mvar,暂时过电压最高值降低至 1.041 pu,为将电压恢复至额定值附近,仍需切除 3 组滤波器;当采用改进无功控制策略时,MMC1 可以提供的最大无功功率为 570 Mvar,与 MMC1 不采用自适应电压控制策略相比,MMC1 传输的无功功率增大了 278.1%,暂时过电压最大值为 1.039 pu,之后只需投入 1 组滤波器使母线电压恢复到额定值附近。改进无功协调控制策略极大地减少了送端换流站向交流系统注入的无功功率,减少了滤波器的动作次数,抑制了交流母线电压的抬升。

#### 4.3 算例 3: 孤岛风电场风速波动工况

设在 8~11 s 时,孤岛风电场所处地区的风速开始频繁波动,对比送端换流站不投入无功控制策略与投入改进无功协调控制策略,对比分析此



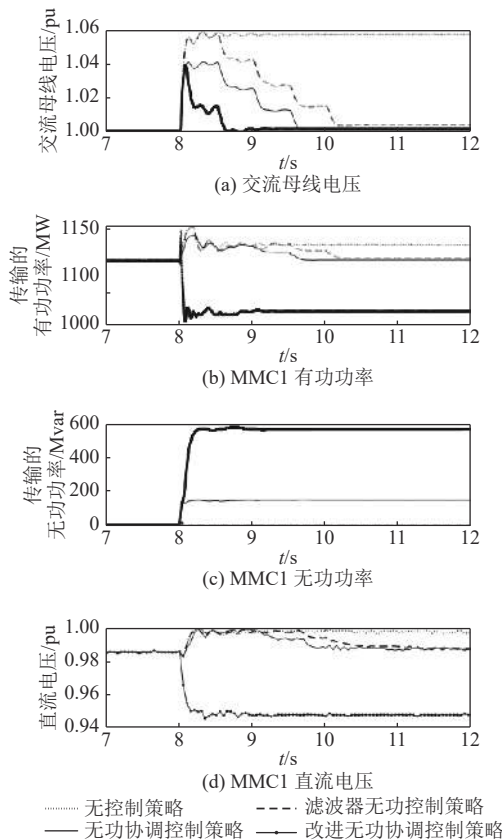


图 7 过电压工况下混联直流系统仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of hybrid cascaded UHVDC system under overvoltage operating condition

时送端系统母线电压，MMC1 换流站传输的有功功率和无功功率，以及 MMC1 直流电压的情况，仿真结果如图 8 所示。

在孤岛风电场风速频繁变化时，交流系统流向直流系统的功率也会频繁变化，交流系统母线电压也出现频繁波动，暂时过电压最大值为 1.027 pu，当采用本文所提的无功协调控制策略后，交流母线电压最高值为 1.012 pu，由于 MMC1 为交流系统提供的无功功率未达到其最大无功极限，因此滤波器未参与无功控制，该控制策略在一定程度上减少了交流输电线路上的无功波动，抑制了交流母线电压的频繁变化。

## 5 结论

1) 在 MMC 过载的情况下，影响其无功功率极限的因素主要是换流器容量限制；在 MMC 非满载的情况下，影响其无功功率极限的因素主要是换流器的调制比。所提 MMC 自适应电压控制策略可以大幅度地增强其无功支撑能力。

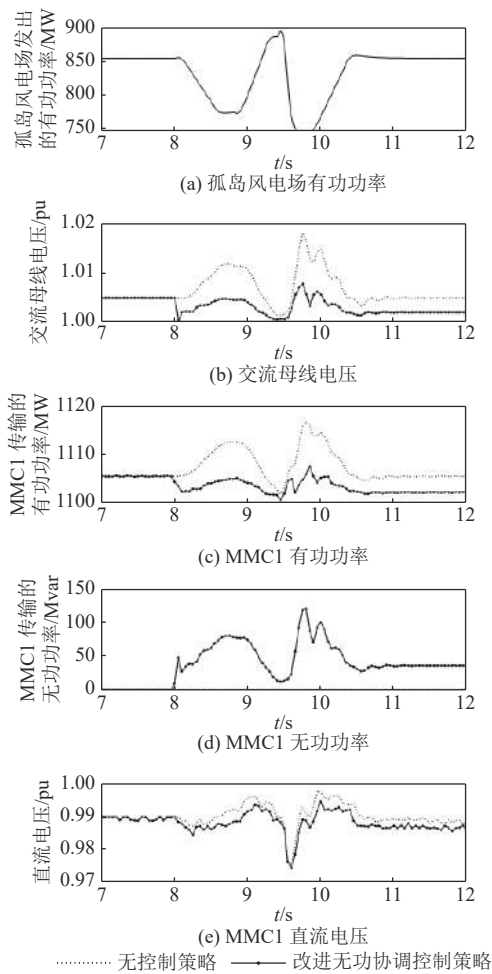


图 8 孤岛风电场功率波动工况下混联直流系统仿真波形  
Fig. 8 Simulation waveforms of hybrid cascaded UHVDC system under power fluctuation in islanded wind farm

2) 所提无功协调控制策略可以减少滤波器的投切次数，降低滤波器的损耗并延长其使用寿命。

3) 所提无功协调控制策略能够抑制由于系统的动态无功变化带来的交流母线电压的波动，并将母线电压值恢复至额定值附近。

4) 所提无功协调控制策略能够减缓由于新能源功率的不稳定而导致的母线电压的波动。

## 参考文献

[1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.  
[2] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.  
CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind

- power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758–3771(in Chinese).
- [3] 陈国平, 梁志峰, 董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 369–379.
- CHEN Guoping, LIANG Zhifeng, DONG Yu. Analysis and reflection on the marketization construction of electric power with Chinese characteristics based on energy transformation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 369–379(in Chinese).
- [4] HX A, KS B, JP C, *et al.* Review of hybrid HVDC systems combining line communicated converter and voltage source converter[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 129.
- [5] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4345–4352.
- GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, *et al.* A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345–4352(in Chinese).
- [6] 杨硕, 郑安然, 彭意, 等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 166–172+179.
- YANG Shuo, ZHENG Anran, PENG Yi, *et al.* DC fault characteristics and recovery control strategy of hybrid cascaded HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 166–172+179(in Chinese).
- [7] 孟沛或, 向往, 迟永宁, 等. 一种适用于大规模新能源远距离外送的分层混联输电系统[J/OL]. 中国电机工程学报:1–17[2021-04-26].
- MENG Peiyu, XIANG Wang, CHI Yongning, *et al.* A hierarchical LCC-MMC hybrid transmission system for transmitting large-scale renewable power over long-distance[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1–17[2021-04-26].
- [8] LIU Y, CHEN Z. A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio in a hybrid multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1568–1581.
- [9] 肖超, 欧阳金鑫, 熊小伏, 等. 基于混合双馈入直流输电系统有功无功协调的后续换相失败控制方法[J]. 电网技术, 43(10):, 2019, 43(10): 3523–3531.
- XIAO Chao, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, *et al.* Subsequent commutation failure control method based on coordination between active and reactive powers in hybrid dual-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3523–3531(in Chinese).
- [10] 陈欢, 王振, 杨治中, 等. 并联混合直流输电系统中传统直流和柔性直流暂态无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1719–1725.
- CHEN Huan, WANG Zhen, YANG Zhizhong, *et al.* Coordinated reactive power control approach for LCC-HVDC and VSC-HVDC in hybrid parallel HVDC system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1719–1725(in Chinese).
- [11] 樊鑫, 郭春义, 杜夏冰, 等. 特高压混合级联直流输电系统抑制逆变电站后续换相失败的无功功率调控方法[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3443–3452.
- FAN Xin, GUO Chunyi, DU Xiabing, *et al.* Reactive power coordinated control approach for suppressing subsequent commutation failure of inverter station in hybrid cascaded UHVDC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3443–3452(in Chinese).
- [12] 李佳, 夏勇军, 严才, 等. 混合多馈入直流系统VSC-HVDC和滤波器的无功协调控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6):100-106
- LI Jia, XIA Yongjun, YAN Cai, *et al.* Reactive power coordinated control of VSC-HVDC and filter in hybrid multi-feed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6):100-106.
- [13] 王炳辉, 黄天啸, 吴涛, 等. MMC柔性直流换流站无功级联控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(05): 137–142.
- WANG Binghui, HUANG Tianxiao, WU Tao, *et al.* Cascaded control strategy of reactive power for MMC flexible DC converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(05): 137–142(in Chinese).
- [14] 杨治中. 并联混合直流输电系统无功协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [15] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72–76.
- ZHANG Wang, HAO Junfang, CAO Sen, *et al.* Design of reactive power control for HVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 72–76(in Chinese).
- [16] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [17] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38–46+20.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, AI Xiaomeng, *et al.* Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38–46+20(in Chinese).

收稿日期: 2021–10–14

作者简介:

李昊(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电, E-mail: lihao19981031@163.com;

全义(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电, E-mail: 979184776@qq.com;

赵成勇(1964), 男, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为高压直流输电, E-mail: chengyongzhao2@163.com.