

面向新型电力系统的柔性直流换流器 统一控制架构

文劲宇¹, 张浩博¹, 向往^{1*}, 孟沛彧², 林卫星¹, 周猛³, 左文平³, 程时杰¹

1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北省 武汉市 430074;
2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东省 广州市 510663;
3. 格瑞美科技(武汉)有限公司, 湖北省 武汉市 430073

Unified High Voltage Direct Current Converter Control Dedicated for New Power Systems

WEN Jinyu¹, ZHANG Haobo¹, XIANG Wang^{1*}, MENG Peiyu², LIN Weixing¹,
ZHOU Meng³, ZUO Wenping³, CHENG Shijie¹

1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, Hubei Province, China;
2. Power Dispatching and Control Center, CSG, Guangzhou 510663, Guangdong Province, China;
3. Gridmind Technology (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430073, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The development of new power systems has put forward higher demands for flexible DC transmission technology. With the proposal of the heterogeneous series converter, the flexible DC converter has been unified at the topology level. However, at the control level, although the traditional control has the power decoupling ability, there is a close coupling between AC voltage, DC voltage, and submodule capacitor voltage, which makes it difficult to fully utilize the advantages of flexible operation of fully controlled devices based converters. This article first proposes the concept of control degree of freedom based on traditional DC converter control structures, and introduces a characterization method of modulation ratio to construct a multi-degree of freedom control system for MMC converters. By analyzing the voltage coupling mechanism inside MMC and its relationship with modulation ratio, the correlation between various MMC control strategies is systematically revealed, forming a 4-degree of freedom unified control structure for MMC converters with "unified function and unified structure". And the applications and potentials of the 4-degree of freedom control structure are analyzed for MMC converters with different control objectives in flexible DC transmission systems. Finally, the performances of MMC 4-degree of freedom control in typical application scenarios are verified in a single-end MMC physical dynamic

simulation experimental system.

KEY WORDS: flexible DC transmission systems; modular multilevel converter; voltage coupling; 4-degree of freedom control; modulation ratio; dynamic simulation experiment

摘要: 新型电力系统的发展对柔性直流输电技术提出了更高需求, 随着异构串联型直流换流器拓扑架构的提出, 柔直换流器已在拓扑层面实现结构统一。然而, 在控制层面, 传统柔直换流器控制虽然具备功率解耦控制能力, 但交流电压、直流电压和子模块电容电压之间存在紧密耦合, 难以发挥柔直换流器全控型器件运行灵活性高的优势。首先, 基于现有直流换流器控制架构, 提出控制自由度的概念, 并引入调制比的表征方法, 构建模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的多自由度控制体系; 然后, 通过分析 MMC 换流器内部的电压耦合机理及其与调制比的关系, 系统地揭示了现有 MMC 换流器的各种控制策略之间的关联性, 形成具备“功能统一、结构统一”的 MMC 换流器的 4 自由度统一控制架构。并针对柔直系统中不同控制目标的 MMC 换流器分析 4 自由度控制架构的应用及其控制潜能; 最后, 在单端 MMC 物理动模实验系统中对 MMC 换流器 4 自由度控制在典型应用场景下的性能进行实验验证。

关键词: 柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 电压耦合; 4 自由度控制; 调制比; 动模实验

基金项目: 国家自然科学基金项目(52237004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52237004).

0 引言

现代高压直流输电(high voltage direct current,

HVDC)技术从上世纪中叶开始起步,发展非常迅速,形成了常规直流输电和柔性直流(简称柔直)输电两类 HVDC 技术,均已实现大规模工程应用^[1-2]。常规直流输电采用基于晶闸管的电网换相换流器(line commutated converter, LCC),LCC 换流器具有成本低、抗冲击能力强等优点,但不具备自换相能力,因此常规直流连接的两端电网必须要有足够的强度,且 LCC 换流器固有的换相失败风险始终是电网安全的严重隐患。高压柔性直流输电主要采用基于 IGBT 的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC),MMC 换流器具备自换相、有功功率/无功功率解耦控制、能连接无源网络等优点,直接解决了 LCC 换流器存在的上述两大问题;然而,IGBT 成本高、抗冲击能力弱,为此,国内外学者充分利用 IGBT 全控型开关器件的特点,先后提出了多种换流器拓扑,以减少 IGBT 使用个数,提高换流器抗冲击能力^[3-6]。文献[7]突破“同构才能串联、异构只能并联”的换流器构建传统认知,提出了如图 1 所示的异构串联换流器(heterogeneous series converter, HSC)拓扑架构。异构串联型换流器具有高度代表性与通用性,现有的各种常用换流器拓扑均可认为是其特例,因此异构串联型直流换流器可以作为柔直换流器的统一拓扑架构。

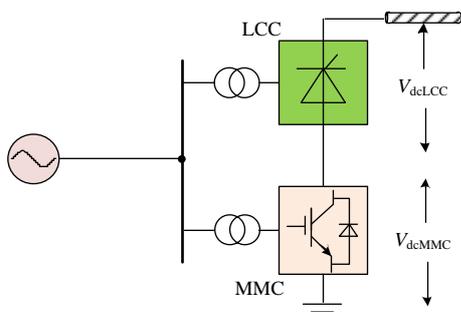


图 1 柔直换流器的异构串联拓扑架构

Fig. 1 Heterogeneous Series Converter Topology for Flexible HVDC

要充分发挥柔性直流输电在新型电力系统构建中的作用,还需有先进的换流器控制技术。直流输电的控制系统的控制层级一般分为 3 个层次^[8]:阀级控制、站级控制(本文简称换流器控制)、直流系统级控制。对于系统级控制来说,需要充分结合交流电网的需要以及直流换流器的控制功能来确定控制策略,不属于本文讨论的范围。LCC 的阀级控制和站级控制都很成熟,MMC 的阀级控制通常采用阶梯波调制,也已比较成熟。因此,本文将主

要研究如何挖掘 MMC 换流器站级控制潜力来提升柔性直流输电的控制性能。

传统柔直 MMC 站级控制主要用于实现有功/无功功率、直流电压以及交流电压构网控制^[9-10]。工程中常采用两电平电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的双闭环矢量控制结构,利用外环控制有功和无功类电气量,内环控制 dq 轴电流,进而生成电压调制波。由于 MMC 在子模块电容投切过程中会产生二倍频环流,MMC 还需配备环流抑制控制器。

随着远距离电力直流输送需求增加,直流短路故障是柔直系统发展面临的主要挑战之一。为降低直流断路器开断容量和直流故障保护速动性需求,文献[11-12]在双闭环矢量控制基础上分别提出了紧急限流控制和自适应限流控制,通过在直流故障期间快速改变投入的子模块数量,从而快速降低换流器直流电压达到抑制故障电流的目的。文献[13-14]提出两级主动限流控制,实现了第一级快速限流,第二级加强限流的效果。文献[15-16]针对全桥-半桥子模块串联型 MMC,突破双闭环矢量控制架构,引入直流电流控制回路,可直接调节电压调制波的直流分量,使 MMC 具备直流短路故障无闭锁穿越能力。基于直流电流控制,文献[17-18]进一步实现了特高压柔直阀组的在线投退。

当前大规模新能源接入交流主网引起系统强度和惯量逐步降低,柔直系统具备大容量和直接接入电网的特点,可有效参与电网支撑。现有柔直支撑方案大都利用异步电网或送端新能源场站充当支撑电源,柔直 MMC 换流器仅作为功率传输设备,不具备支撑能力。而 MMC 内含诸多子模块电容器,可作为能量存储设备主动支撑电网稳定运行。但 MMC 采用 VSC 双闭环矢量控制只能通过调节直流电压实现对电容能量的间接调控^[19]。文献[20]最早提出 MMC 桥臂电容能量的差/共模控制器,分别实现桥臂和相间能量均衡,可直接调控电容能量。然而该控制采用间接电流控制,不具备交流故障限流能力。文献[21-22]在矢量电流控制的基础上,利用环流控制器设计差/共模电容能量控制。参考全桥-半桥子模块串联型 MMC 的控制架构,文献[23]基于直流电流控制器设计了半桥型 MMC 的电容能量控制,具有一定的直流故障限流能力,并提出采用可变最近电平调制、引入子模块电容电压平均值,可省去相间能量均衡控制,具有更简洁的控制架

构。基于该控制架构，开展了诸多基于 MMC 电容能量的电网支撑策略研究，如交流故障穿越^[24-25]、频率/惯量支撑^[26-27]、弱交流电网接入^[28-29]等。

面向新型电力系统建设需求，柔直 MMC 站级控制在不断发展和完善。但现有研究主要聚焦于 MMC 控制功能和应用的拓展，对于不同 MMC 站级控制间的内在联系以及控制架构的深层次演进机理，尚缺乏深入的挖掘与探讨。为此，本文首先对比分析了 LCC 与 MMC 常用的站级控制策略，提出了控制自由度的概念，然后从控制自由度的视角，引入调制比的表征方法，系统地分析了 MMC 的各种控制策略及它们之间的关联性，形成了 MMC 换流器的多自由度控制架构。研究表明，通过采用 4 自由度控制，可以充分利用 MMC 中大量的子模块电容储能能力，使得 MMC 成为一个直接接入超特高压电网的快速响应储能装置，可对直流系统两端所接电网的惯量、频率等实现主动支撑，使换流器超出了传统意义上的交直流换流功能，而且 MMC 的多自由度控制架构具有向下兼容的统一性。

1 换流器的控制自由度

在物理学和数学中，自由度通常用来描述一个系统内部的可变参数数量。换流器控制的主要任务是实现两侧交流电压和直流电压之间的变换，交流电压有电压幅值和相位 2 个状态变量，直流电压有幅值 1 个状态变量。对于 MMC 换流器，其内部具有众多分立布置的子模块电容，电容是储能元件，MMC 具备对这些电容能量进行快速调控利用的潜力^[29]，子模块电容有电压幅值 1 个状态变量。由上文可以看出，MMC 有 4 个参数可变状态变量，本文称之为有 4 个控制自由度。

1.1 LCC 换流器的 1 自由度控制

LCC 换流器由晶闸管构成，晶闸管是半控型功率半导体器件，只能控制器件的开通，不能控制器件的关断，通常采用改变触发角的方式来控制直流电压，进而调控输送有功功率，换流器交直流侧电压的关系^[30]如式(1)所示。

$$\begin{cases} V_{dc} = 1.35V_{ac} \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_r I_{dc} , & \text{整流侧} \\ V_{dc} = 1.35V_{ac} \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_r I_{dc} , & \text{逆变侧} \end{cases} \quad (1)$$

式中： V_{dc} 为直流侧直流电压； V_{ac} 为整流站或逆变站变压器阀侧空载线电压有效值，kV； X_r 为整流站

和逆变站每相的换相电抗； I_{dc} 为直流电流平均值； α 和 β 分别为整流站和逆变站的触发角。

由式(1)可知，LCC 换流器控制只能对直流电压的幅值进行调控，且从控制的角度看，LCC 换流器控制只有触发角 1 个控制量，可称为 1 自由度控制。由于 LCC 换流器的 1 自由度控制不能调节换流器交流侧出口电压的幅值和相位，因此无法实现有功功率和无功率的解耦控制。这导致 LCC 在正常运行时会吸收大量的无功功率，且无功功率随有功功率的增大而增大，工程上需要装设大量的无功补偿装置。

1.2 VSC/MMC 换流器的 2 自由度控制

VSC 采用全控型 IGBT，基于电压调制技术实现功率、电压的灵活控制。VSC 控制的关键在于如何生成满足功率和电压控制需求的交流调制波，即包含幅值和相位 2 个变量。可见，VSC 控制需要具备调控电压幅值和相位的 2 个控制自由度。

为计算需要 VSC 输出的交流电压幅值和相位，现有的 VSC 控制主要分为两大类，间接电流控制^[9]和直接电流控制^[31-32]。目前工程上主流的 VSC 控制主要采用直接电流控制(也即矢量控制)方式，如图 2 所示。其中， d 和 q 轴电流控制回路分别生成交流 d 和 q 轴调制比，即 M_d 和 M_q ^[33]，进一步通过坐标变换生成三相交流电压调制波 $m_j(j=a,b,c)$ 。以 a 相为例，调制比 M_d 、 M_q 和电压调制波 m_j 的关系可表示为

$$m_a = \underbrace{\sqrt{M_d^2 + M_q^2}}_{\text{幅值}} \cos(\omega t - \underbrace{\arctan \frac{M_q}{M_d}}_{\text{相位}}) \quad (2)$$

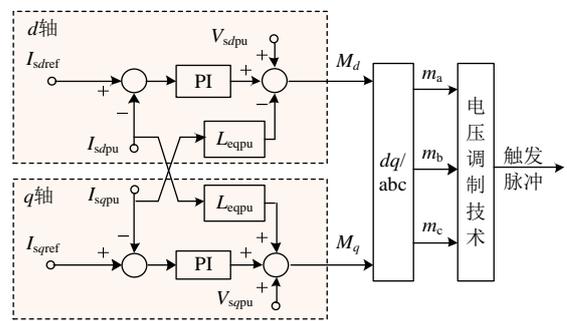


图2 VSC 矢量电流控制

Fig. 2 Conventional vector current control of VSC

由式(2)可知，调制比 M_d 和 M_q 唯一确定交流电压调制波的幅值和相位，可作为 VSC 控制的 2 个控制自由度。因此，可称 VSC 的矢量控制为 2 自由度控制。由于采用电网电压定向，该控制可以实现有功功率和无功率的解耦控制。

2 自由度控制架构同样适应于近年来快速发展的 MMC 换流器，并已经在相关工程中广泛采用。由于 VSC 换流器和 MMC 换流器均是采用电压调制的电压源型换流器，所以在 dq 坐标系下两种换流器的站级控制也是一致的。

2 MMC 多自由度控制演进

现有 MMC 沿用 VSC 的 2 自由度控制。然而，

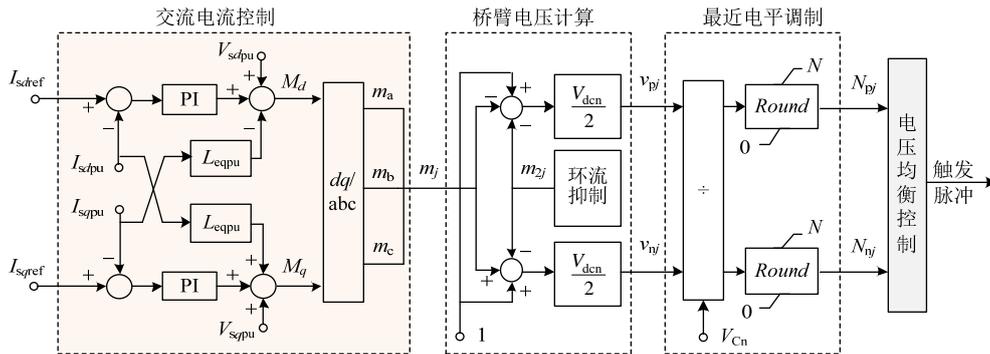


图 3 MMC 换流器 2 自由度控制

Fig. 3 Two-degree of freedom control of MMC

为分析 MMC 换流器 2 自由度控制的性能，基于文献[22,28]，可以得到 MMC 的单相等效动态电路，如图 4 所示。具体推导过程详见附录 A。其中，定义交流耦合系数 k_{acj} 和直流耦合系数 k_{dcj} 分别为

$$\begin{cases} k_{acj} = (N_{nj} - N_{pj}) / 2 \\ k_{dcj} = N_{nj} + N_{pj} \end{cases} \quad (3)$$

式中 N_{pj} 和 N_{nj} 分别为第 j 相上下桥臂投入子模块个数。图 4 中， V_{sj} 为第 j 相交流相电压； L_{eq} 为交流侧等效电感； R_0 为桥臂等效电阻； L_0 为桥臂电感； C_0 为子模块电容； V_{Cavgj} 为 j 相单元子模块电容电压平均值。因此，MMC 交流侧电压通过交流耦合系数 k_{acj} 与子模块电容电压耦合，直流侧电压则通过直流耦合系数 k_{dcj} 与子模块电容电压耦合。

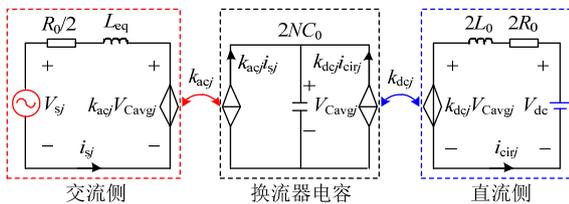


图 4 MMC 单相等效动态电路

Fig. 4 Equivalent dynamic circuit of MMC

由图 3 可知，2 自由度控制架构上下桥臂投入的子模块个数为

$$N_{pj} = \text{Round}\left(\frac{V_{pj}}{V_{Cn}}\right), \quad N_{nj} = \text{Round}\left(\frac{V_{nj}}{V_{Cn}}\right) \quad (4)$$

式中： V_{Cn} 为额定电容电压； $\text{Round}(x)$ 为取整函数；

与 VSC 换流器直流侧有集中式大电容不同，MMC 电容分散在子模块内部，子模块电容的投切使得 MMC 具有更高的控制灵活性，沿用 VSC 换流器的 2 自由度控制体系可能限制 MMC 的控制潜力。

2.1 2 自由度控制

图 3 给出了 MMC 换流器 2 自由度控制的详细控制架构^[9]。其中包括交流电流控制、桥臂电压计算和最近电平调制环节。

v_{pj} 和 v_{nj} 分别为上桥臂和下桥臂电压调制波。

将式(4)代入式(3)中，忽略幅值较小的二倍频环流抑制输出，可得 k_{acj} 和 k_{dcj} (忽略取整函数)为

$$k_{acj} = \frac{m_j V_{dcn}}{2V_{Cn}} = \frac{m_j N}{2}, \quad k_{dcj} = \frac{V_{dcn}}{V_{Cn}} = N \quad (5)$$

式中： m_j 为 j 相的交流电压调制波，与调制比 M_d 和 M_q 有关，表达式为式(2)； N 为桥臂子模块总数； V_{dcn} 为额定直流电压。

根据式(5)，得到 2 自由度控制下的 MMC 单相等效动态电路，如图 5 所示。忽略图 5 中桥臂电阻 R_0 ，可得稳态下 MMC 交直流侧电压表达式为

$$V_{sj} = \frac{1}{2} m_j V_{dc}, \quad V_{dc} = NV_{Cavgj} \quad (6)$$

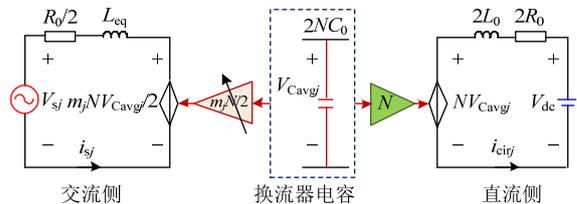


图 5 2 自由度控制下的 MMC 单相等效动态电路

Fig. 5 Equivalent circuit of two-degree of freedom control

由式(6)可知，当发生直流短路故障时，直流电压跌落，虽可通过调节 m_j 使得交流电压不变，但考虑到交流调制波 m_j 的幅值存在调节范围限制(0, 1]，当 m_j 达到限制后，交流电压也会随之出现跌落。因此，2 自由度控制下的 MMC 交、直流侧电压也存

在有一定的耦合,无法应对直流线路短路故障。同时,直流电压与子模块电容电压之间存在强耦合关系。子模块电容电压变化时,直流电压也会相应的变化。

2.2 3 自由度控制

针对传统2自由度控制下MMC交流电压、直

流电压和子模块电容电压三者之间存在的耦合问题,文献[34-35]提出了直流调制技术,通过引入直流调制比 M_{dc} ,可直接对直流电压的幅值进行调控,可称为MMC换流器3自由度控制。此时,MMC在控制层面体现为3种调制比 M_d , M_q 和 M_{dc} ,控制结构如图6所示。

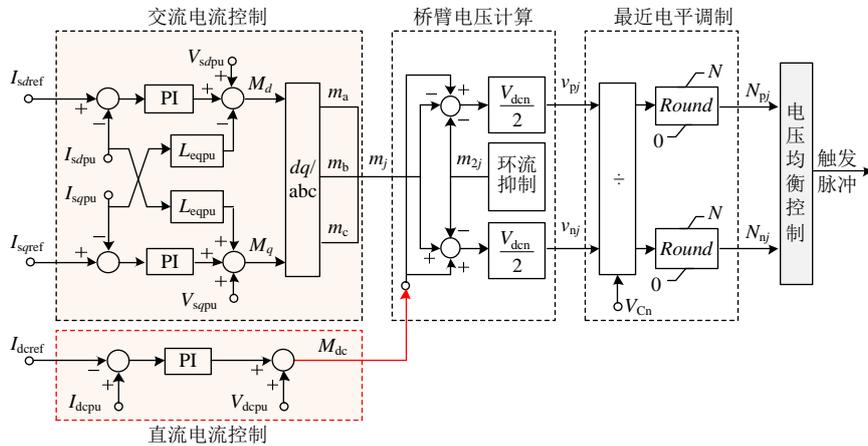


图6 MMC换流器3自由度控制

Fig. 6 Three-degree of freedom control of MMC

基于式(3),由图6得到采用3自由度控制时交、直流耦合系数 k_{acj} 、 k_{dcj} 分别为

$$k_{acj} = \frac{m_j V_{dcn}}{2V_{Cn}} = \frac{m_j N}{2}, \quad k_{dcj} = \frac{M_{dc} V_{dcn}}{V_{Cn}} = M_{dc} N \quad (7)$$

因此,3自由度控制下MMC单相等效动态电路可由图7表示。MMC交直流电压表达式为

$$V_{sj} = \frac{1}{2} \frac{m_j}{M_{dc}} V_{dc}, \quad V_{dc} = M_{dc} N V_{Cavgj} \quad (8)$$

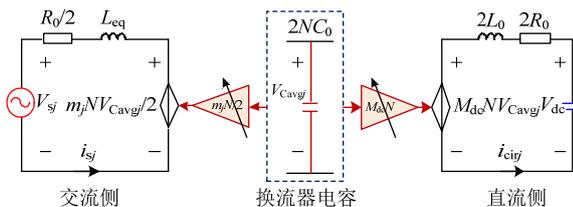


图7 3自由度控制下的MMC单相等效动态电路

Fig. 7 Equivalent circuit of three-degree of freedom control

对比式(6)、(8)可知,当发生直流短路故障时,直流电压跌落,采用3自由度控制可通过降低 M_{dc} 来避免 m_j 达到上限值,并可维持交流电压不变,因此实现了交流电压与直流电压的完全解耦,能够有效应对直流短路故障。

考虑到 M_{dc} 存在调节范围限制,当 M_{dc} 达到限制后,直流电压与子模块电容电压之间依然存在比例关系。因此,3自由度控制下MMC直流电压与子模块电容电压仍然存在一定的耦合。

2.3 4 自由度控制

为进一步实现MMC直流电压与子模块电容电压解耦,文献[22]在3自由度控制的基础上引入电容电压调制比 M_C ,可对电容电压幅值进行调控,因此将MMC换流器控制自由度提升到了4维,形成了4自由度控制架构,控制层面体现为4种调制比 M_d , M_q , M_{dc} 和 M_C ,如图8所示。其中, M_C 为三相子模块电容电压的平均值。

由图8可知,引入电容电压调制后,上下桥臂投入子模块个数为

$$N_{pj} = Round\left(\frac{v_{pj}}{M_C}\right), \quad N_{nj} = Round\left(\frac{v_{nj}}{M_C}\right) \quad (9)$$

将式(9)代入式(3),可得交直流耦合系数 k_{acj} 和 k_{dcj} :

$$k_{acj} = \frac{m_j V_{dcn}}{2M_C}, \quad k_{dcj} = \frac{M_{dc} V_{dcn}}{M_C} \quad (10)$$

考虑到相单元能量均衡,可认为 $M_C = V_{Cavgj}$ 。因此,基于式(10)可以得到4自由度下的MMC等效动态电路图,如图9所示。

基于图9,MMC交直流侧电压表达式为

$$V_{sj} = \frac{1}{2} m_j V_{dcn}, \quad V_{dc} = M_{dc} V_{dcn} \quad (11)$$

由式(11)可知,当采用4自由度控制时,MMC交流侧和直流侧等效电路中均不含有子模块电容电压,实现了交流电压、直流电压和子模块电容电

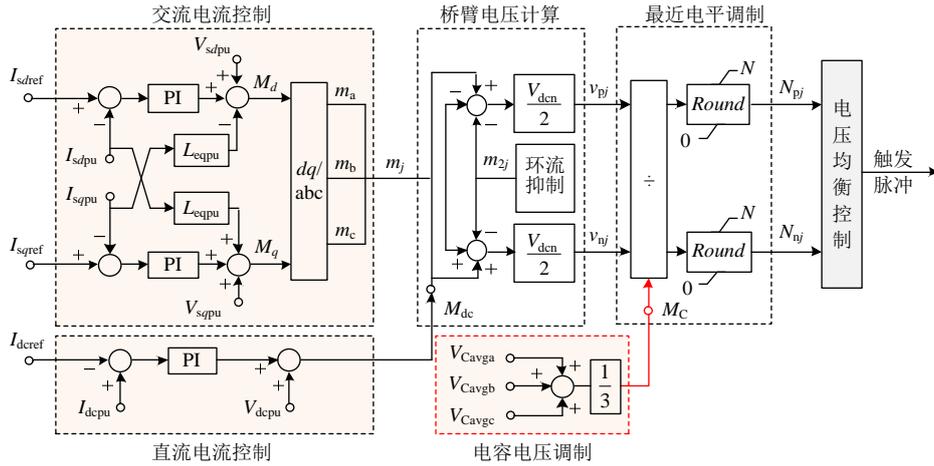


图 8 MMC 换流器 4 自由度控制

Fig. 8 Four-degree of freedom control of MMC

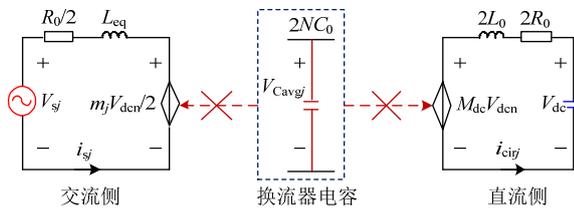


图 9 4 自由度控制下的 MMC 单相等效动态电路

Fig. 9 Equivalent circuit of four-degree of freedom control
压三者之间的完全解耦。

因此，MMC 换流器 4 自由度控制能够独立调
控子模块电容电压，并可充分利用 MMC 中电容储
能能力，使得 MMC 成为一个直接接入超高压电
网的快速响应储能装置，具备对交流电网的主动惯
量、频率支撑潜力。

综上所述，MMC 多自由度控制架构下 MMC
交直流耦合系数的取值可总结为表 1。同时，对应
的 MMC 交直流电压与调制比和子模块电容电压之
间的表达式如表 2 所示。

表 1 MMC 交直流耦合系数取值

Table 1 Value of MMC AC and DC coupling coefficients

控制架构	交流耦合系数 k_{acj}	直流耦合系数 k_{dcj}
2 自由度控制	$m_j N / 2$	N
3 自由度控制	$m_j N / 2$	$M_{dc} N$
4 自由度控制	$m_j V_{dcn} / (2M_C)$	$M_{dc} V_{dcn} / M_C$

表 2 MMC 交直流电压表达式

Table 2 Expressions of MMC AC and DC side voltage

控制架构	交流电压 V_{sj}	直流电压 V_{dc}
2 自由度控制	$m_j V_{dc} / 2$	$N V_{Cavgj}$
3 自由度控制	$m_j V_{dc} / (2M_{dc})$	$M_{dc} N V_{Cavgj}$
4 自由度控制	$m_j V_{dcn} / 2$	$M_{dc} V_{dcn}$

3 MMC 换流器 4 自由度统一控制架构

由前文分析可知，4 自由度控制具有最灵活的
控制能力和最全面的控制结构，因此可作为 MMC
换流器的统一控制架构，实现对不同自由度控制的
综合表征，如图 10 所示(图中考虑了 3 次电压谐波

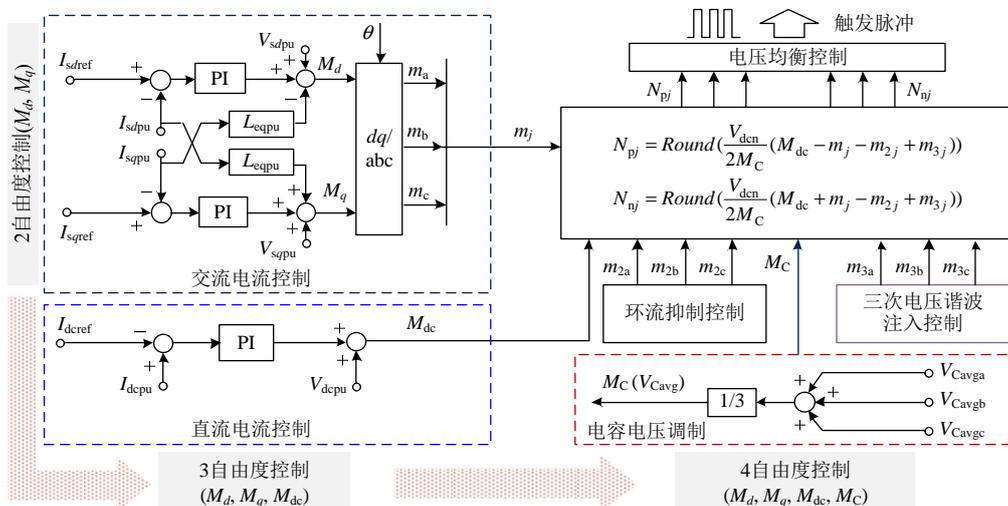


图 10 MMC 换流器统一控制架构

Fig. 10 Unified control structure of MMC

注入控制)。根据图 10, 可以得到 4 自由度控制下桥臂电压调制波表达式为

$$\begin{cases} v_{pj} = \frac{V_{\text{dcn}}}{2}(M_{\text{dc}} - m_j - m_{2j} + m_{3j}) \\ v_{nj} = \frac{V_{\text{dcn}}}{2}(M_{\text{dc}} + m_j - m_{2j} + m_{3j}) \end{cases} \quad (12)$$

式中 m_{2j} 和 m_{3j} 分别为 2 倍频和 3 倍频分量, 幅值较小。因此, MMC 桥臂电压调制波的直流分量由 M_{dc} 决定, 交流基波分量由 m_j 决定。

由图 10 中深蓝色方框可知, 常规 2 自由度控制仅具备对交流电压幅值和相位 2 个状态变量的直接调控能力, 控制层面上体现为 2 种电压调制比(M_d 和 M_q)。相较于 4 自由度控制, 可认为图 10 中 2 自由度控制的直流调制比 M_{dc} 和电容电压调制比 M_C 均为额定值 1 pu。忽略 m_{2j} 和 m_{3j} , MMC 桥臂电压调制波可表示为

$$v_{pj} = \frac{V_{\text{dcn}}}{2}(1 - m_j), \quad v_{nj} = \frac{V_{\text{dcn}}}{2}(1 + m_j) \quad (13)$$

由式(13)可知, 2 自由度控制下桥臂电压调制波的直流分量恒定, MMC 无法直接调控直流电压。且由表 1、2 可知, 2 自由度控制下直流耦合系数为常数 N , 直流电压与子模块电容电压满足严格的正比关系。因此, 直流电压调节只能通过改变电容电压(电容能量)实现。同时, 根据表 2 可知, 由于 m_j 调节范围的限制, 直流电压与交流电压之间也存在一定的耦合关系。

3 自由度控制进一步具备对直流电压幅值 1 个状态变量的直接调控能力, 在控制层面引入了第 3 个电压调制比 M_{dc} , 如图 10 中亮蓝色方框所示。3 自由度控制下的桥臂电压调制波可近似表示为

$$v_{pj} = \frac{V_{\text{dcn}}}{2}(M_{\text{dc}} - m_j), \quad v_{nj} = \frac{V_{\text{dcn}}}{2}(M_{\text{dc}} + m_j) \quad (14)$$

式中 3 自由度控制通过调节 M_{dc} 可直接调控桥臂电压的直流分量, 克服了常规 2 自由度控制无法直接调节直流电压的问题。

根据表 2 中交流电压 V_{sj} 表达式, 由于 M_{dc} 可抵消直流电压变化, 3 自由度控制不会产生因 m_j 调节范围限制导致的交直流电压耦合的问题。但由于 M_{dc} 存在调节范围限制, 子模块电容电压与直流电压依然存在耦合。

4 自由度控制在 3 自由度控制的基础上可实现对子模块电容电压 1 个状态变量的直接调控, 控制层面引入了第 4 种电压调制比 M_C , 如图 10 中红色

方框所示。由式(12)可知, 4 自由度控制同样可以调节 M_{dc} 来调控桥臂电压的直流分量, 具有与 3 自由度控制相同的直流电压直接调控能力。此外, 通过引入 M_C , 表 2 所示的 MMC 交直流侧电压表达式中均不含有子模块电容电压。且交流电压 V_{sj} 仅与交流调制波 m_j (交流调制比 M_d, M_q) 有关, 直流电压只与直流调制比 M_{dc} 有关, 实现了 MMC 交流电压、直流电压和子模块电容电压三者之间的完全解耦。因此, 4 自由度控制下的 MMC 具有子模块电容电压(电容能量)的独立调节能力。

综上所述, 4 自由度控制在兼具 3 自由度和 2 自由度控制优点的同时, 解决了它们存在的电压耦合控制问题, 有更高的控制自由度, 具备向下兼容的功能统一性。由图 10 所示 MMC 统一控制结构可知, 4 自由度控制还可根据控制需要, 通过固定相关调制比为额定值, 实现控制器向 3 自由度控制和 2 自由度控制转化, 具备向下兼容的结构统一性。三种控制策略下的控制自由度、调制比和控制成效的综合对比如表 3 所示。其中“√”表示调制比可控, “1”表示调制比为额定值 1 pu。

表 3 控制架构对比总结

Table 3 Comparison of different control methods

控制架构	控制自由度	调制比			电压耦合关系	控制成效
		M_{dq}	M_{dc}	M_C		
4 自由度控制	4	√	√	√	全解耦	子模块电容能量精准调控; 向下兼容
3 自由度控制	3	√	√	1	交直流电压解耦	直流短路故障应对; 向下兼容
2 自由度控制	2	√	1	1	全耦合	交流有功无功解耦

4 MMC 换流器 4 自由度控制的应用

由前述分析可知, MMC 换流器的 4 自由度控制实现了子模块电容电压与直流电压的解耦。因此, 可通过利用子模块电容电压的独立可调性, 发挥 MMC 的电容能量调节能力, 实现更高的运行灵活性。本节将针对具有不同控制目标的柔直换流站, 分析 4 自由度控制技术在柔直系统应用中的适用性。

4.1 定功率站控制

针对柔直输电系统中的定功率站 MMC, 文献[22]提出了 4 自由度控制架构下的定功率站控制框图, 如图 11 所示。其中, 交流功率控制沿用常规 2 自由度控制下的实现方式。有功和无功功率控制作为

交流电流控制的外环，生成交流 d 轴和 q 轴电流的参考值，进一步利用 M_d 和 M_q 实现对 MMC 换流器交流电压的调节，实现功率解耦控制。

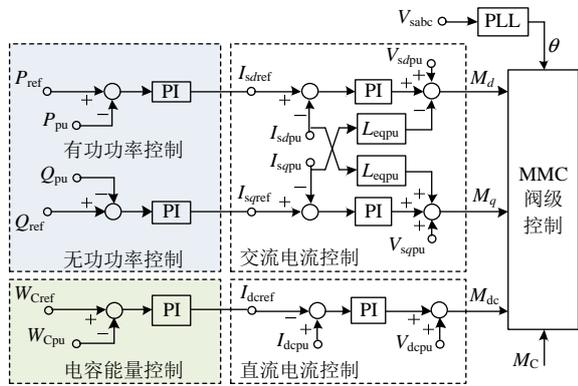


图 11 定功率站 4 自由度控制架构

Fig. 11 Four-degree of freedom control of power station

为了实现对 MMC 电容能量的调控，电容能量控制基于直流电流控制实现，通过调节 M_{dc} 控制 MMC 直流侧电流，进而改变直流侧功率，造成 MMC 交直流侧功率不平衡，从而可对 MMC 的电容能量进行调控。

4.2 定直流电压站控制

图 12 给出了文献[22]提出的定直流电压站 MMC 的 4 自由度控制架构框图。与 2 自由度控制下的直流电压控制实现方式不同，由于 4 自由度控制下直流电压只与直流调制比 M_{dc} 有关(如表 2 所示)，因此直流电压控制可直接作用于直流电流控制的外环，通过调节直流调制比 M_{dc} ，实现对 MMC 出口直流电压的控制。

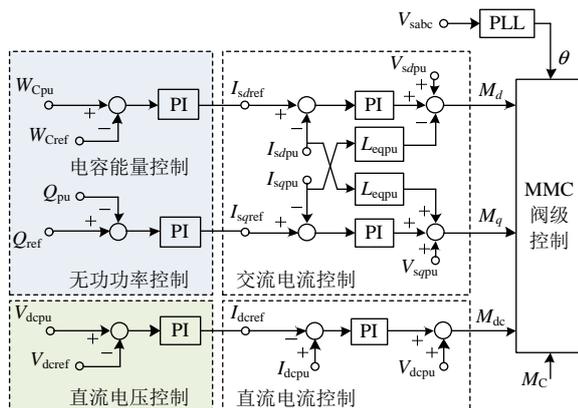


图 12 定直流电压站 4 自由度控制架构

Fig. 12 Four-degree of freedom control of DC voltage station

定直流电压站的电容能量控制施加在 d 轴交流电流控制的外环。由于 MMC 采用交流电网电压定向，电容能量控制可以通过调节交流直流轴电流 I_{sdpu} 改变有功功率，进而造成 MMC 交直流侧功率不平

衡，实现对电容能量的调控。此时， q 轴电流控制依然用于控制 MMC 输出的无功功率。

4.3 定交流电压站控制

面向大规模新能源基地、海上风电孤岛送出场景，柔直系统的送端换流站需要能够为新能源场站提供稳定的交流电压源。因此，文献[24-25]针对定交流电压站 MMC 设计了 4 自由度控制架构，如图 13 所示。

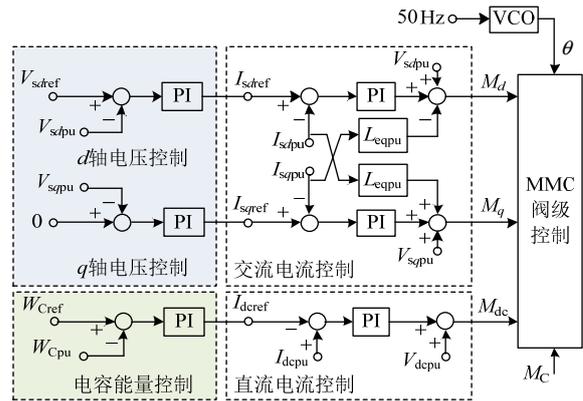


图 13 定交流电压站 4 自由度控制架构

Fig. 13 Four-degree of freedom control of AC voltage MMC station

其中，MMC 通过压控振荡器(voltage controlled oscillator, VCO)自主生成频率和相位。交流电压控制采用与 2 自由度控制下相同的实现方式。交流电压(d 、 q 轴电压)控制分别为交流电流控制的外环，可稳定建立海上交流电网电压。电容能量控制作用于直流电流控制的外环，通过调控直流输出功率，可实现对海上换流站能量的控制。

4.4 交直流双端口构网控制

随着东南沿海地区大举开发分布式发电和海上风电，柔直系统受端电网的短路容量和系统惯量降低，动态行为发生深刻变化。受端 MMC 换流站需要具备交流侧构网控制能力为受端交流电网提供主动支撑。此外，对于新能源基地孤岛经柔直外送系统，受端 MMC 换流站还需控制直流系统电压维持稳定。因此，此时受端 MMC 换流站需要同时具备交直流双端口构网的能力，对柔直系统控制提供了新需求。为适应受端电网新变化，文献[27]提出了基于 4 自由度控制的 MMC 交直流双端口构网控制架构，如图 14 所示。

由图 14 可知，交流电压控制和直流电压控制分别作用于交流电流控制的直流电流控制的外环，分别利用交流调制比 M_d 、 M_q 和直流调制比 M_{dc} 实现交流电压和直流电压的分立控制。同时，

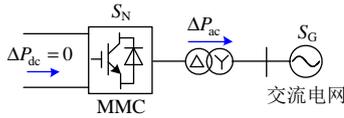


图 15 单端 MMC 并网系统

Fig. 15 Single-terminal MMC system

$$\Delta P_{ac} = -\frac{W_{C0}}{S_N} \frac{d\Delta W_{Cpu}}{dt} \quad (16)$$

式中： W_{C0} 为单台 MMC 额定电容能量； W_{Cpu} 为电容能量标么值。

考虑文献[27]中的交流电网简化频率响应模型，利用容量加权法将电网中不同参数的发电机进行等效聚合，可以得到计及 MMC 支撑功率的交流电网频率动态方程，表示为(以同步发电机总装机容量 S_G 为基准)：

$$2H_s \frac{d\Delta f_{pu}}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_L - D\Delta f_{pu} + \frac{S_N}{S_G} \Delta P_{ac} \quad (17)$$

式中： Δf 为交流系统频率变化标么值(基准值为 50 Hz)； H_s 为基于容量加权法得到的交流电网等效惯性时间常数，s； D 为等效阻尼系数； ΔP_m 为等效机械功率变化； ΔP_L 为电网中负荷扰动功率，均为标么值。

设 MMC 支撑功率提供的惯性时间常数为 H_{MMC} ，则式(17)还可以进一步表示为

$$2(H_s + H_{MMC}) \frac{d\Delta f_{pu}}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_L - D\Delta f_{pu} \quad (18)$$

因此，根据式(16)—(18)可以得到 MMC 电容能量与交流电网频率间的关系：

$$\Delta W_{Cpu} = \frac{2H_{MMC}S_G}{W_{C0}} \Delta f_{pu} = k_H \Delta f_{pu} \quad (19)$$

可见，为了使得 MMC 具备惯性时间常数为 H_{MMC} 的支撑能力，电容能量的调控需要满足式(19)所示的条件。其中，系数 k_H 的选取由 MMC 电容能量利用极限 ΔW_{Clim} 和交流系统频率偏差极限 Δf_{lim} 决定，可表示为

$$k_H = \frac{\Delta W_{Clim}}{\Delta f_{lim}} \quad (20)$$

由文献[27]可知，在 4 自由度控制下电容能量变化范围为 $\Delta W_{Clim} = [-0.4, 1.25]pu$ ，考虑 Δf_{lim} 为 $\pm 0.4\%$ 频率约束范围，因此在能量释放和能量吸收时的系数 k_H 分别为

$$\begin{cases} k_H = \frac{-0.4}{-0.004} = 100, & \text{能量释放} \\ k_H = \frac{1.25}{0.004} = 312.5, & \text{能量吸收} \end{cases} \quad (21)$$

进一步地，由式(19)可以得到 MMC 在能量释放和能量吸收时所具备的 H_{MMC} 为

$$H_{MMC} = \frac{W_{C0}}{2S_G} k_H \quad (22)$$

以 5.1 节中 MMC 为例(容量为 $S_N = 1\,000\text{ MW}$ ，额定电容能量为 40 MJ)，假设交流电网发电机总装机容量 $S_G = 3\,000\text{ MW}$ ，代入式(22)可以计算得到单端 MMC 所能够提供的惯性时间常数 H_{MMC} 为

$$\begin{cases} H_{MMC} = 0.67\text{ s}, & \text{能量释放} \\ H_{MMC} = 2.08\text{ s}, & \text{能量吸收} \end{cases} \quad (23)$$

因此，采用 4 自由度控制时，单端 MMC 利用存储的电容能量能够提供的惯性时间常数可达到秒级。同时，由式(22)可知，随着接入交流电网的柔直 MMC 个数增加，柔直系统所提供的惯性支撑能力也将成倍数增加。

6 MMC 换流器 4 自由度控制实验验证

为验证 MMC 换流器 4 自由度控制的性能，采用文献[40]提出的物理模拟实验快速系统原型 (rapid system prototype, RSP) 技术，搭建了如图 16 所示的单端 MMC 物理动模实验系统，系统接线图如图 17 所示。其中，交流电源为逆变器电源。MMC 原型样机和交流电源的参数在表 5 中给出。



图 16 单端 MMC 动模实验装置图

Fig. 16 Single-terminal three-phase MMC test system

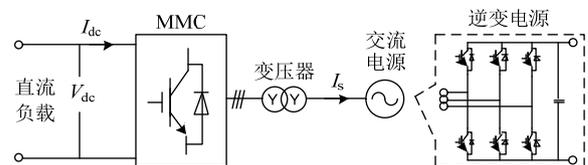


图 17 动模实验接线原理图

Fig. 17 The electrical circuit of the test system

由前文分析可知，MMC 换流器的 4 自由度控制的优势性能在于能够实现直流电压与子模块电容电压的解耦控制。因此，为体现 4 自由度控制对直流电压和子模块电容电压的调控能力，本文分别以第 4 节中的定直流电压站控制和交直流双端口构网控制为例开展了动模实验验证。

表5 实验系统基本参数

Table 5 Basic parameters of the test system

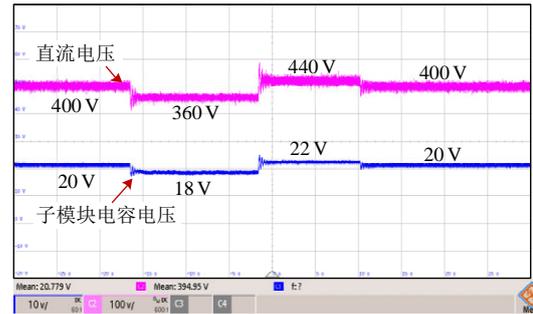
类别	参数	值
MMC 样机	额定容量/VA	2 000
	额定直流电压/V	400
	桥臂子模块个数	20
	子模块电容/mF	6.6
	桥臂电抗/mH	10
变压器	电压变比	380 V/200 V
	漏抗/%	5
交流电源	额定容量/VA	5 000
	额定输出电压/V	380
	额定输出频率/Hz	50

6.1 定直流电压站控制验证

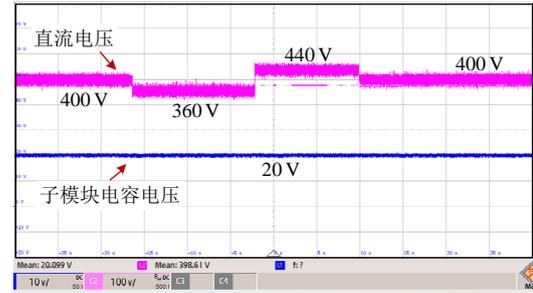
为验证4自由度控制相较于常规2自由度控制的优势,本节首先对比了图12所示控制与采用2自由度控制的定直流电压站控制的性能。2自由度控制的定直流电压站采用文献[9]中的典型控制架构,其直流电压控制通过交流 d 轴电流控制实现。

首先调节直流电压控制参考值由额定值400V下降至360V,再调节上升至440V,最后控制直流电压回到额定值400V。图18(a)和(b)分别给出了采用2自由度控制和4自由度控制在连续改变直流电压参考值下的实验对比结果。由图18(a)可以看出,正常运行工况下,直流电压稳定运行在400V。当改变直流电压控制参考值后,2自由度控制下直流电压可以很好地跟随参考值变化。但此时MMC子模块电容电压也会随之变化,且电容电压与直流电压之间满足严格的正比关系,比例系数为单个桥臂中子模块总数 $N=20$,这也验证了前述式(6)中直流电压与子模块电容电压满足的关系式。而对于图18(b),当采用4自由度控制时,MMC同样能够按照参考值准确地调节直流电压,且可以维持子模块电容电压为额定值20V不变,与图9所示的MMC电压解耦特性一致。因此,验证了MMC换流器4自由度控制的直流电压和子模块电容电压的解耦控制能力。

进一步地,为验证4自由度控制的电容能量调节能力,调节能量控制参考值从额定值1.0 pu下降到0.81 pu(对应子模块电容电压0.9 pu,即18V),随后调节能量参考值至额定值后,再上升至1.69 pu(对应子模块电容电压1.3 pu,即26V),最后调节能量恢复至额定值(对应子模块电容电压1.0 pu,即20V)。系统直流电压和子模块电容电压的实验波形如图19所示。



(a) 2自由度控制



(b) 4自由度控制

图18 直流电压控制性能实验验证

Fig. 18 Experimental waveforms of DC voltage control

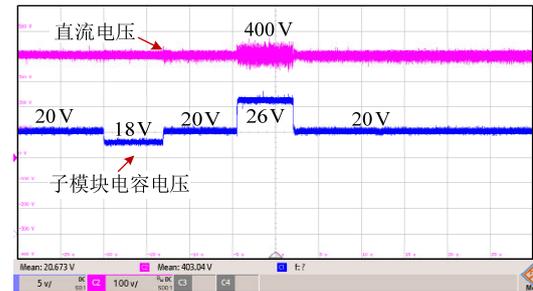


图19 能量调控性能实验波形

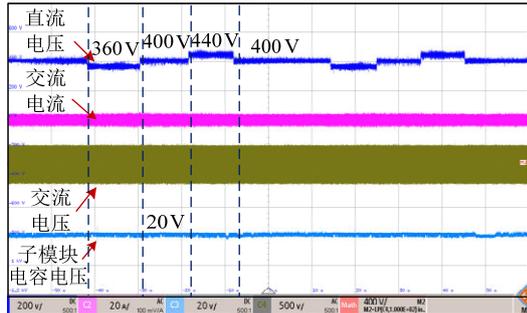
Fig. 19 Experimental waveform of energy control

由图19可以看出,MMC子模块电容电压可以很好地跟随控制指令值变化,同时直流电压能够稳定在额定值400V不变。而对于2自由度控制,电容能量只能通过调节直流电压实现,如图18(a)所示。因此,该实验结果验证了4自由度控制可以在直流电压不变的情况下灵活地调节子模块电容电压,实现对电容能量的精准调控。需要说明的是,由于本文采用的MMC样机子模块个数较少,当MMC子模块电容电压上升至1.3 pu(26V)后,桥臂投入的子模块个数也随之减小。此时子模块电容的充放电过程对直流侧电压质量的影响较大,使直流电压产生轻微波动,如图19所示。但上述过程中直流电压的平均值不会受到影响,始终保持在400V,本文前述分析依然有效。

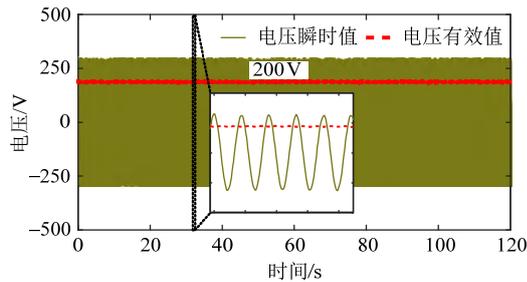
6.2 交直流双端口构网控制验证

交直流双端口构网控制具备交直流电压的分立控制能力。首先验证所提交直流双端口构网控制

对直流电压的控制能力，图 20 给出了直流电压参考值变化时的实验波形图。调节直流电压控制参考值从 400 V 降低至 360 V，并在恢复至额定值后进一步上升至 440 V。由图 20(a)可以看出，直流电压可以很好地跟随控制参考值，验证了所提控制的直流电压控制能力。此外，在直流电压变化期间，子模块电容电压可以维持在额定值 20 V 不变，因此交直流双端口构网控制同样具备子模块电容电压与直流电压的解耦控制能力。



(a) 电压电流波形



(b) 交流线电压波形

图 20 直流电压控制性能实验波形

Fig. 20 Experimental waveform of DC voltage control

图 20(b)给出了直流电压调控期间 MMC 交流侧线电压的瞬时值和有效值波形。由实验结果可知，交流电压有效值在直流电压变化期间能够稳定维持在额定值 200 V 不变，与图 9 所示的 MMC 交直流电压解耦特性相符。综上所述，直流电压调控实验验证了 4 自由度控制的交流电压、直流电压和子模块电容电压的完全解耦性能。

进一步，为验证所提交直流双端口构网控制的无 PLL 的自主同步性能，对交流电源频率发生变化后的 MMC 的响应特性进行了实验分析。将电源频率从 50 Hz 下降至 49.5 Hz，并进一步下降至 49 Hz，实验波形图如图 21 所示。可以看出，MMC 换流器的输出频率可以快速跟踪交流电源频率变化。同时，MMC 电容能量(子模块电容电压)始终保持恒定。因此，上述结果验证了所提交直流双端口构网控制的自主电网同步能力，且自主同步过程不影响对电容能量的控制性能。

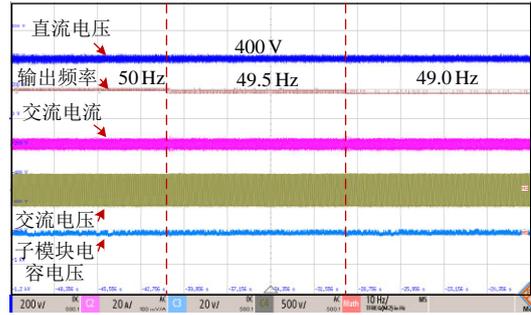
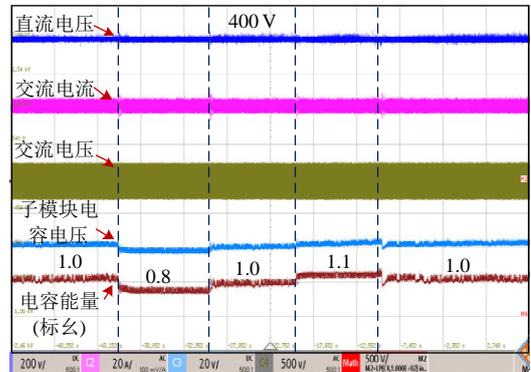


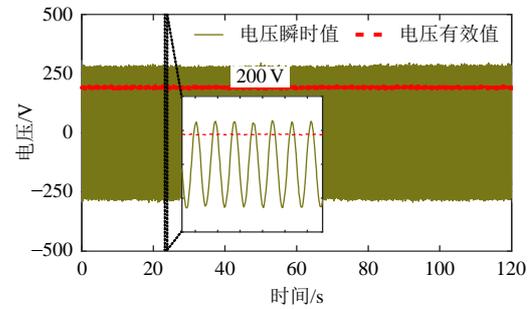
图 21 系统频率变化响应实验波形

Fig. 21 Response waveforms under grid frequency changes

最后，为验证交直流双端口构网控制的能量控制性能，在 MMC 启动后改变图 14 中能量同步控制的参考值，分别将能量参考值调节为 0.8 pu 和 1.1 pu，实验波形如图 22 所示。



(a) 电气量实验波形



(b) 交流线电压波形

图 22 能量调控性能实验波形

Fig. 22 Experimental waveform of energy regulation

由图 22(a)中可以看出，电容能量可以较好地跟随能量参考值变化，验证了能量同步控制的能量灵活调控能力。直流电压调控期间 MMC 交流侧线电压瞬时值和有效值波形如图 22(b)所示。由交直流电压的实验波形可知，MMC 换流器的交流电压有效值和直流电压在能量调节过程中分别维持在额定值 200 V 和 400 V 不变，同样验证了图 9 所示 4 自由度控制下的 3 种电压完全解耦的控制能力，也验证交直流双端口构网控制的交、直流电压控制能力。

7 结论

本文首先提出控制自由度的概念,揭示了控制自由度与换流器状态变量的对应关系,量化了柔直换流器的控制成效。进一步,提出控制自由度在控制层面的表征——调制比,分析调制比与控制自由度的等效本质,基于调制比构建柔直 MMC 换流器的多自由度控制体系,实现对不同控制结构及其功能在控制自由度下的统一归纳,揭示现有 MMC 换流器多自由度控制策略的演进过程及之间的关联性,形成具备“功能统一、结构统一”的 MMC 换流器 4 自由度控制架构:

1) 控制功能层面,4 自由度控制在 2 自由度控制具备的 2 状态变量(交流电压幅值和相位)调控能力的基础上,具备对直流电压幅值和子模块电容电压幅值 2 个状态变量的直接调控功能,实现了控制“功能统一”性。

2) 控制结构层面,4 自由度控制在 2 自由度控制交流调制比(M_d , M_q)的基础上,引入直流调制比 M_{dc} 和电容电压调制比 M_C ,且通过使能 M_{dc} 和 M_C ,可分别实现与 3 自由度控制和 2 自由度控制之间的灵活转化,具备向下兼容的控制“结构统一”性。

3) 面向柔直系统的多个典型应用场景,MMC 换流器 4 自由度控制均能够使得 MMC 具备类似储能装置的电容能量调控能力,且不会影响换流器的原有控制目标。动模实验结果也验证了 MMC 换流器 4 自由度统一控制架构的控制成效,表明其具备一定的工程适用性和可行性。

综上所述,随着异构串联型直流换流器拓扑架构的提出,柔直换流器已经实现了拓扑架构的统一。而本文构建的柔直换流器 4 自由度控制架构,实现了对现有柔直换流器控制的统一,可为进一步发展统一柔直换流器(统一拓扑架构+统一控制架构)技术奠定坚实的控制基础,也为构建新型电力系统提供有力支撑。

参考文献

- [1] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505(in Chinese).
- [2] 舒印彪,陈国平,贺静波,等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69(in Chinese).
- [3] 向往,林卫星,文劲宇,等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171-5179.
XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu, et al. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5179(in Chinese).
- [4] 李笑倩,刘文华,宋强,等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6389-6397.
LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6389-6397(in Chinese).
- [5] 张建坡,赵成勇,孙海峰. 基于改进拓扑的 MMC-HVDC 控制策略仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1032-1040.
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng. Simulations of control strategies in MMC-HVDC with an improved topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1032-1040(in Chinese).
- [6] 林卫星,向往,文劲宇. 用于模块化多电平换流器的子模块拓扑及其应用: 中国, 104052026A[P]. 2014-09-17.
LIN Weixing, XIANG Wang, WEN Jinyu. Submodule topology for modular multi-level transverter and application of modular multi-level transverter: CN, 104052026A[P]. 2014-09-17(in Chinese).
- [7] 文劲宇,孟沛戡,向往,等. 面向新型电力系统的直流输电换流器统一拓扑架构[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 84-98.
WEN Jinyu, MENG Peiyu, XIANG Wang, et al. Unified high voltage direct current converter topology dedicated for new power systems[J]. New Type Power Systems, 2023, 1(1): 84-98(in Chinese).
- [8] 李斌. 柔性直流系统故障分析与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
LI Bin. Fault analysis and protection of MMC-HVDC system[M]. Beijing: Science Press, 2019(in Chinese).
- [9] 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, 2017: 211-229.
XU Zheng, TU Qingrui, GUAN Minyuan, et al. Voltage source converter based HVDC power transmission

- systems[M]. Beijing: China Machine Press, 2017: 211-229(in Chinese).
- [10] YANG Renxin, SHI Gang, CAI Xu, et al. Autonomous synchronizing and frequency response control of multi-terminal DC systems with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2504-2514.
- [11] 倪斌业, 向往, 周猛, 等. 柔性直流电网紧急限流控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3527-3536.
- NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Research on the emergency current-limiting control in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3527-3536(in Chinese).
- [12] NI Binye, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. An adaptive fault current limiting control for MMC and its application in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 920-931.
- [13] 李再男, 贾科, 刘鑫, 等. 半桥型 MMC 直流侧故障的两级主动限流控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8400-8410.
- LI Zainan, JIA Ke, LIU Xin, et al. Two-stage active current-limiting control for half-bridge MMC DC-side faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8400-8410(in Chinese).
- [14] 肖磊石, 卢启付, 冉旺, 等. 直流故障下 MMC-HVDC 的两段式限流保护策略[J]. 广东电力, 2023, 36(5): 58-66.
- XIAO Leishi, LU Qifu, RAN Wang, et al. Two-stage current limiting protection strategy for MMC-HVDC under DC fault[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(5): 58-66(in Chinese).
- [15] 林卫星, 向往, 文劲宇. 一种交直流解耦控制方法及其在柔性直流输电系统的应用: 中国, 106505642A[P]. 2017-03-15.
- LIN Weixing, XIANG Wang, WEN Jinyu. AC/DC decoupling control method and application thereof in flexible DC power transmission system: CN, 106505642A[P]. 2017-03-15(in Chinese).
- [16] XIANG Wang, LIN Weixing, XU Lie, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [17] 鲁江, 董云龙, 张庆武, 等. 基于直流调制度的特高压柔直阀组在线投入策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 154-161.
- LU Jiang, DONG Yunlong, ZHANG Qingwu, et al. Valve group online entry strategy for VSC-UHVDC system based on DC modulation degree[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 154-161(in Chinese).
- [18] 郭贤珊, 周扬, 杨美娟, 等. 基于阀组串联的柔性直流单阀组在线投入/退出控制方案[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3393-3398.
- GUO Xianshan, ZHOU Yang, YANG Meijuan, et al. Research on control scheme for single converter online entry/exit in dual-converter based VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3393-3398(in Chinese).
- [19] ZHU Jiebei, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.
- [20] ANTONOPOULOS A, ANGQUIST L, NEE H P. On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [21] FAN Shengfang, ZHANG Kai, XIONG Jian, et al. An improved control system for modular multilevel converters with new modulation strategy and voltage balancing control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 358-371.
- [22] SAAD H, GUILLAUD X, MAHSEREDJIAN J, et al. MMC capacitor voltage decoupling and balancing controls[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 704-712.
- [23] 向往, 文劲宇, 张浩博, 等. 柔性直流输电系统三维度控制[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3385-3395.
- XIANG Wang, WEN Jinyu, ZHANG Haobo, et al. Three-degree control of MMC based high voltage direct current transmission system[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3385-3395(in Chinese).
- [24] 张浩博, 向往, 文劲宇. 应对受端交流故障的海上风电柔直并网系统主动能量控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4600-4613.
- ZHANG Haobo, XIANG Wang, WEN Jinyu. Active energy control of offshore wind power MMC-HVDC system to handle ac faults of receiving-end power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4600-4613(in Chinese).
- [25] 张浩博, 向往, 周猛, 等. 海上风电柔直并网系统主动能量控制与交流耗能装置协同策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4319-4329.
- ZHANG Haobo, XIANG Wang, ZHOU Meng, et al. Cooperative strategy of active energy control and AC energy dissipation device in offshore wind power MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4319-4329(in Chinese).
- [26] LEON A E. Short-term frequency regulation and inertia emulation using an MMC-based MTDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2854-2863.

- [27] ZHANG Haobo, XIANG Wang, HE Yongjie, et al. Optimal energy utilization of MMC-HVDC system integrating offshore wind farms for onshore weak grid inertia support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1304-1318.
- [28] ZHANG Haobo, XIANG Wang, WEN Jinyu. Dual grid-forming control with energy regulation capability of MMC-HVDC system integrating offshore wind farms and weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 261-272.
- [29] YANG Renxin, SHI Gang, ZHANG Chen, et al. Internal energy based grid-forming control for MMC-HVDC systems with wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(1): 503-512.
- [30] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
ZHAO Wanjun. High voltage direct current transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2011(in Chinese).
- [31] SCHAUDER C, MEHTA H. Vector analysis and control of advanced static VAR compensators[J]. IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), 1993, 140(4): 299-306.
- [32] SVENSSON J. Inclusion of dead-time and parameter variations in VSC modelling for predicting responses of grid voltage harmonics[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Proceedings published by Various Publishers, 1997, 3: 3.216-3.221.
- [33] XU Lie, ANDERSEN B R, CARTWRIGHT P. Control of VSC transmission systems under unbalanced network conditions[C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No.03CH37495). Dallas: IEEE, 2003: 626-632.
- [34] LIN Weixing, JOVICIC D, NGUEFEU S, et al. Full-bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.
- [35] 周猛, 向往, 林卫星, 等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2062-2072.
ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current-limiting control to handle overhead line fault in DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2062-2072(in Chinese).
- [36] 国家电网公司. 大容量并网同步调相机技术规范(试行)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
State Grid Corporation of China. Technical Specifications for Large-Capacity Grid-Connected Synchronous Condenser (Trial)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016(in Chinese).
- [37] 郎木晨烟. 转动惯量-6: 同步调相机的转动惯量及收益计算[EB/OL]. (2022-05-13)[2024-04-06]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404768667328970907&sudaref=www.baidu.com>.
- LANGMUYANCHEN. The rotational inertia and benefit calculation of a synchronous condenser.[EB/OL]. (2022-05-13)[2024-04-06]. [https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404768667328970907&sudaref=www.baidu.com\(in Chinese\)](https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404768667328970907&sudaref=www.baidu.com(in%20Chinese)).
- [38] 三峡集团. 白鹤滩右岸 8 台百万千瓦机组转轮, 全部“精品”! [EB/OL]. (2021-07-27)[2024-04-06]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_13760349.
China Three Gorges Corporation. 8 million kilowatt turbine generators on the right bank of Baihetan hydropower station [EB/OL]. (2021-07-27)[2024-04-06]. [https://m.thepaper.cn/baijiahao_13760349\(in Chinese\)](https://m.thepaper.cn/baijiahao_13760349(in%20Chinese)).
- [39] 方杰, 曹春建, 方晓红, 等. 白鹤滩水电站水轮机主要参数及结构选择研究[J]. 人民长江, 2022, 53(1): 137-141, 166.
FANG Jie, CAO Chunjian, FANG Xiaohong, et al. Study on main parameters and construction selection of turbine in Baihetan Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2022, 53(1): 137-141, 166(in Chinese).
- [40] 文劲宇, 张浩博, 林思齐, 等. 面向新型电力系统物理模拟实验的快速系统原型技术[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 15-22.
WEN Jinyu, ZHANG Haobo, LIN Siqi, et al. Rapid system prototype technology for physical simulation experiments of new power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 15-22(in Chinese).

附录 A

半桥型 MMC 拓扑结构如图 A1 所示。其中, V_{dc} 为直流输出电压; I_{dc} 为直流电流; R_0 为桥臂等效电阻, L_0 为桥臂电抗; C_0 为子模块电容; i_{pj} 、 i_{nj} 分别为第 j 相($j=a, b, c$)的上、下桥臂电流; v_{pj} 、 v_{nj} 分别为第 j 相的上、下桥臂输出电压; i_{sj} 为阀侧相电流; L_{ac} 为交流系统电抗; v_{sj} 为交流系统相电压。

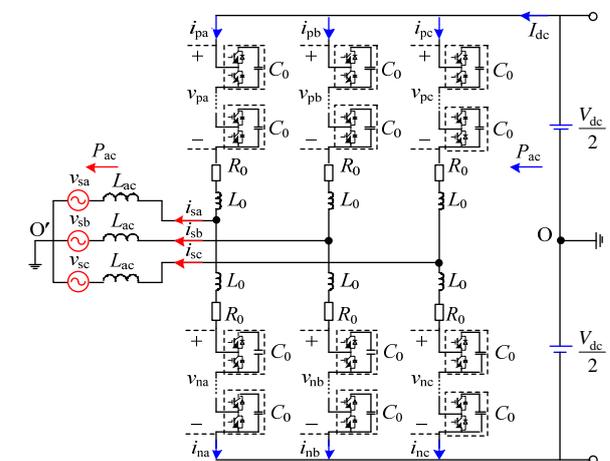


图 A1 半桥型 MMC 拓扑结构

Fig. A1 Typical topology of half-bridge MMC

由图 A1 可知, MMC 交直流侧电压和桥臂电压(v_{sj} 、 V_{dc} 和 $v_{n,pj}$)满足下式:

$$\begin{cases} L_{eq} \frac{di_{sj}}{dt} + \frac{R_0}{2} i_{sj} = -v_{sj} + \frac{1}{2}(v_{nj} - v_{pj}) \\ L_0 \frac{di_{cirj}}{dt} + R_0 i_{cirj} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{1}{2}(v_{nj} + v_{pj}) \end{cases} \quad (A1)$$

式中 L_{eq} 为交流侧等效电抗, 表示为 $L_{eq} = L_{ac} + L_0/2$ 。定义相间环流 i_{cirj} 为上下桥臂电流之和, 即 $i_{cirj} = (i_{pj} + i_{nj})/2$ 。

同时, 考虑到 MMC 电压均衡策略, 假设 MMC 上下桥臂所有子模块间的均压效果良好, 桥臂电压 v_{pj} 、 v_{nj} 可表示为

$$\begin{cases} v_{pj} = N_{pj} V_{Cavgj} \\ v_{nj} = N_{nj} V_{Cavgj} \end{cases} \quad (A2)$$

式中: N_{pj} 和 N_{nj} 分别为上桥臂和下桥臂投入的子模块个数; V_{Cavgj} 为相单元平均子模块电容电压。

将式(A2)代入式(A1)中, 可得:

$$\begin{cases} L_{eq} \frac{di_{sj}}{dt} + \frac{R_0}{2} i_{sj} = -v_{sj} + \frac{N_{nj} - N_{pj}}{2} V_{Cavgj} \\ 2L_0 \frac{di_{cirj}}{dt} + 2R_0 i_{cirj} = V_{dc} - (N_{nj} + N_{pj}) V_{Cavgj} \end{cases} \quad (A3)$$

根据 MMC 平均开关函数模型, 相单元平均子模块电容电压动态可表示为

$$\frac{dV_{Cavgj}}{dt} = \frac{1}{2C_0} (S_{pj} i_{pj} + S_{nj} i_{nj}) \quad (A4)$$

式中 S_{pj} 和 S_{nj} 分别为上、下桥臂的平均开关函数, 表示为 $S_{p,nj} = N_{p,nj}/N$ 。因此, 式(A4)可进一步写为

$$\frac{dV_{Cavgj}}{dt} = \frac{1}{2NC_0} (N_{pj} i_{pj} + N_{nj} i_{nj}) \quad (A5)$$

考虑到桥臂电流 $i_{p,nj}$ 、相间环流 i_{cirj} 和交流电流 i_{sj} 之间满足如下关系:

$$\begin{cases} i_{pj} = i_{cirj} - \frac{i_{sj}}{2} \\ i_{nj} = i_{cirj} + \frac{i_{sj}}{2} \end{cases} \quad (A6)$$

将式(A6)代入式(A5)可得到:

$$\frac{dV_{Cavgj}}{dt} = \frac{1}{2NC_0} \left[\frac{N_{nj} - N_{pj}}{2} i_{sj} + (N_{pj} + N_{nj}) i_{cirj} \right] \quad (A7)$$

定义交流耦合系数 k_{acj} 和直流耦合系数 k_{dcj} 分别为

$$\begin{cases} k_{acj} = (N_{nj} - N_{pj})/2 \\ k_{dcj} = N_{nj} + N_{pj} \end{cases} \quad (A8)$$

结合式(A3)、(A7)和(A8), 可以得到 MMC 的单相等效动态电路, 如图 4 所示。



文劲宇

收稿日期: 2024-04-10。

作者简介:

文劲宇(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、直流输电、直流电网等, jinyu.wen@hust.edu.cn;

张浩博(1999), 男, 博士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电系统的保护与控制, zhanghaobo9902@foxmail.com;

*通信作者: 向往(1990), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为柔性直流输电与海上风电并网技术, xiangwang1003@hust.edu.cn;

孟沛或(1997), 男, 博士, 从事直流输电系统建模与控制, 新能源并网等研究, pennymeng1@foxmail.com;

周猛(1988), 男, 博士, 主要研究方向为直流电网等, zhoumeng4077@foxmail.com;

左文平(1988), 男, 博士, 主要研究方向为柔性直流输电、直流-直流自耦变压器、供电质量综合提升等, radio.zuo@foxmail.com;

林卫星(1986), 男, 博士, 主要研究方向为模块化多电平换流器、直流电网、直流输电等研究, weixinglin@foxmail.com;

程时杰(1945), 男, 中国科学院院士, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用、电力系统运行与控制、超导电力等, sjcheng@hust.edu.cn。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)

Unified High Voltage Direct Current Converter Control Dedicated for New Power Systems

WEN Jinyu¹, ZHANG Haobo¹, XIANG Wang^{1*}, MENG Peiyu², LIN Weixing¹,
ZHOU Meng³, ZUO Wenping³, CHENG Shijie¹

(1. Huazhong University of Science and Technology; 2. Power Dispatching and Control Center, CSG;
3. Gridmind Technology (Wuhan) Co., Ltd.)

KEY WORDS: flexible DC transmission systems; modular multilevel converter; voltage coupling; 4-degree of freedom control; modulation ratio; dynamic simulation experiment

With the proposal of the heterogeneous series converter, MMC has been unified at the topology level. At the control level, although MMC control is constantly developing and improving, existing research mainly focuses on expanding MMC control functions and applications, lacking in-depth exploration of the internal connections and the deep evolution mechanism between different MMC control architectures.

As shown in Fig. 1, this paper proposes a 4-degree of freedom control architecture for MMC converters with “unified function and unified structure”. The comparisons of different control schemes are summarized in Table 1:

1) At the control function level, in addition to having the ability to adjust the two state variables (AC voltage amplitude and phase) of 2-degree-of-freedom control, 4-degree of freedom control can also directly regulate the DC voltage amplitude and sub-module capacitor voltage amplitude, achieving “unified control functions”.

2) At the control structure level, based on the AC modulation ratios (M_d , M_q) of 2-degree of freedom control, 4-degree of freedom control introduces the DC

modulation ratio M_{dc} and the capacitor voltage modulation ratio M_c . By respectively setting M_{dc} and M_c to 1, it can flexibly switch to 3-degree of freedom control and 2-degree of freedom control, possessing the downward-compatible “unified control structure”.

For multiple typical application scenarios of MMC-HVDC systems, the 4-degree of freedom control enables MMC to have capacitor energy regulation capabilities similar to energy storage devices without affecting the original control objectives of the converter station. The results of dynamic simulation experiments also verify the control effectiveness of the 4-degree of freedom unified control architecture, indicating its engineering applicability and feasibility.

In summary, the 4-degree freedom control architecture of the flexible DC converter constructed in this paper unifies the existing control of the flexible DC converter. This unified control architecture paves the way for the unified flexible DC converter technology (including unified topology architecture and unified control architecture), which provides robust support for constructing new power systems.

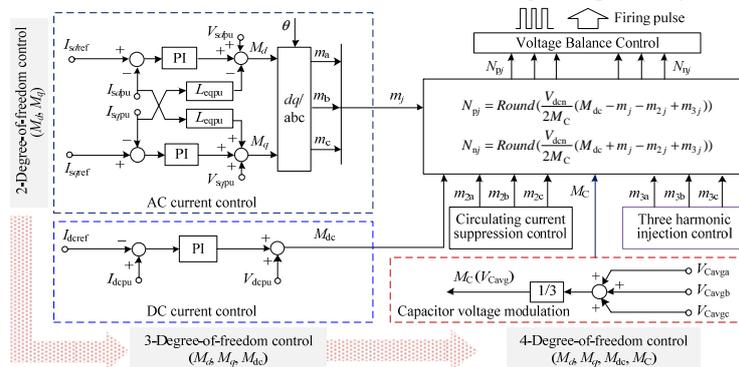


Fig. 1 Unified control structure of MMC

Table 1 Comparison of different control methods

Control structure	degree of freedom	Modulation ratio			Voltage coupling characteristics	Functions
		M_{dq}	M_{dc}	M_c		
4-degree of freedom control	4	√	√	√	DC voltage, AC voltage and capacitor voltage are decoupled	<ul style="list-style-type: none"> ● Regulate capacitor energy precisely ● Downward compatibility
3-degree of freedom control	3	√	√	1	DC voltage and AC voltage are decoupled	<ul style="list-style-type: none"> ● Cope with DC short circuit faults ● Downward compatibility
2-degree of freedom control	2	√	1	1	All voltages are coupled	<ul style="list-style-type: none"> ● Decoupling control of active power and reactive power