

基于惯量控制的多端柔性直流系统动态性能提升策略

张利东¹, 李一畅², 甘慧辰², 肖晃庆²

(1. 南方电网科学研究院, 广州 510663; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510641)

摘要: 多端柔性直流系统具有高效性与经济性, 非常适用于大规模新能源多站点接入。然而, 直流系统相较于交流系统惯性更低, 易受扰动影响, 严重时甚至可能导致系统失稳。针对这一问题, 提出了基于 MMC 等效子模块数的惯量控制法和虚拟储能元件惯量控制法。前者通过改变 MMC 调制过程中上、下桥臂等效投入的子模块数量, 提升 MMC 直流侧等效子模块电容。后者通过在 MMC 外环功率控制中加入扰动补偿量, 实现 MMC 直流侧虚拟储能的引入。在此基础上, 提出了一种多端柔性直流系统惯量综合控制策略, 通过对两种控制方法叠加使用, 实现更优的扰动平抑效果。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了在运的南澳三端柔性直流系统模型, 验证所提控制策略的有效性。结果表明, 与未采用任何惯量控制策略以及采用单一惯量控制的系统相比, 采用所提惯量控制策略在系统发生扰动后直流电压和有功功率波动的平抑效果最好。

关键词: 模块化多电平换流器; 惯性时间常数; 等效子模块数; 虚拟电容电感

Dynamic Performance Enhancement Strategy for Multi-Terminal Flexible DC Systems Based on Inertia Control

ZHANG Lidong¹, LI Yichang², GAN Huichen², XIAO Huangqing²

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The multi-terminal flexible DC system offers high efficiency and economic benefits, making it particularly suitable for large-scale integration of renewable energy from multiple sites. However, compared to AC systems, DC systems have lower inertia and are more susceptible to disturbances, which can lead to system instability in severe cases. To address this issue, this paper proposes two inertia control methods: the inertia control method based on the equivalent sub-module number of the modular multilevel converter (MMC) and the inertia control method using virtual energy storage elements. The first method increases the equivalent capacitance of the MMC DC side by adjusting the number of sub-modules contributed by the upper and lower arms during the modulation process of the MMC. The second method introduces virtual energy storage on the MMC DC side by adding disturbance compensation to the outer loop power control. Building upon these approaches, this paper presents an inertia integrated control strategy for multi-terminal flexible DC systems, achieving better disturbance suppression by combining both control methods. Finally, a three-terminal flexible DC system model based on Nan'ao Three-Terminal MTDC System is developed in PSCAD/EMTDC to validate the effectiveness of the proposed control strategy. The results show that, compared to systems without any inertia control strategy or those employing a single inertia control method, the system with the proposed inertia control strategy demonstrates the best suppression of DC voltage and active power fluctuations following a disturbance.

Key words: modular multilevel converter; inertia time constant; equivalent sub-module number; virtual capacitive and inductance

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U24B2085); 中国南方电网有限责任公司科技项目(SEPRI-K243005)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (U24B2085); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (SEPRI-K243005).

0 引言

在当前全球能源安全问题突出、环境污染问题严峻的大背景下,大力发展清洁能源,是中国乃至全球能源与经济实现可持续发展的重大需求,也是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要举措^[1-4]。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的多端直流输电技术具有损耗小、功率灵活可控等优势,在大规模清洁能源并网与传输方面具有良好的应用前景,是大规模新能源多点平滑接入电力系统的重要手段^[5-8]。目前,我国已建成南澳三端直流、舟山五端直流、张北四端直流、昆柳龙三端直流等标志性工程。

然而,由于直流系统的惯量较低,任何一个换流站直流电压或直流电流的扰动均会引起直流系统潮流和电压的大幅波动,严重时甚至引起直流系统振荡失稳。随着新能源规模化发展,一方面风能、太阳能等新能源发电功率的微小变化可能引起整个系统的直流电压大幅度波动^[6-7]。另一方面,随着恒功率逆变电站数量的增多,其等效恒功率负荷特性会弱化直流系统的阻尼,扰动下的多端直流系统有可能激发出高频或低频功率振荡^[9-12]。因此,需要采取相应的措施提升直流系统的动态性能。

目前已有直流系统的动态性能提升方法主要有4类:1)参数优化法;2)电流/功率前馈法;3)储能辅助法;4)电气弹簧法。

当多端直流输电系统中某个换流站功率发生变化时,定直流电压控制换流站需要一定的响应时间,此时系统内的不平衡功率将加在直流系统的等效电容中。定直流电压控制换流站的动态响应越快,直流电压的波动就越小。基于此原理,可以通过优化控制器参数,提升换流站直流电压的动态响应速度^[13-15]。参数优化法可能会削弱系统的稳定性,因此在控制参数设计时需要综合考虑系统的稳定性和动态响应特性。在多端直流输电系统中,利用电流/功率前馈法可提升系统动态性能^[16-20]。前馈补偿解耦的原理较为简单,但该方法会导致系统维数增加,计算困难。多端直流输电系统的电压波动,本质上是直流系统功率不平衡的表现。利用储能装置快速吸收和释放功率的功能,可以减轻直流系统功率不平衡的程度。一种实现手段是在多端直流输电系统中并联一个超级电容^[21-22],或者在模块

化多电平换流器的每个子模块中嵌入一个小型储能装置^[23],削弱换流站之间的相互影响。另一种是在新能源发电单元出口并联储能装置,抑制多端直流系统的电压波动^[24-26]。但由于目前储能装置的价格较为昂贵,该方法的经济效益较差。电气弹簧法可用于缓冲新能源出力波动性和不确定性。该方法最早应用在交流配电网中^[27-28],后来拓展到了直流输电领域^[29-30]。直流电气弹簧通过调整本地可控负荷功率来抵消新能源出力的波动性。这种方法在高压输电领域需要大容量的非关键性负荷做支撑,牺牲这部分非关键性负荷的供电可靠性,实现难度较大。

针对上述问题,本文提出了基于MMC等效子模块数量的实际电容控制方法和基于虚拟电容和电感的虚拟惯量控制方法。在此基础上,提出了一种多端柔性直流系统惯量控制策略,能显著提升系统惯量。在PSCAD/EMTDC中搭建了多端柔性直流系统的电磁暂态仿真模型,通过与无附加控制、单一控制的算例进行对比,验证了所提方法的可行性和有效性。

1 MMC与多端直流输电的原理及控制

MMC电路高度模块化能够通过增减接入换流器的子模块数量来满足不同功率和电压等级直流输电需求,每个换流器有6个桥臂,每个桥臂中含有的 N 个子模块(submodule, SM)与一个电抗器相串联,子模块一般采用半桥或全桥的结构。每一相上下桥臂合称一个相单元。

MMC通常采用最近电平逼近调制在 t 时刻上下桥臂需要投入的子模块数量分别为:

$$n_{nj}(t) = \frac{N}{2} + \text{round}\left(\frac{u_j^*(t)}{U_{ct}}\right) \quad (1)$$

$$n_{pj}(t) = \frac{N}{2} - \text{round}\left(\frac{u_j^*(t)}{U_{ct}}\right) \quad (2)$$

式中: $n_{nj}(t)$ 、 $n_{pj}(t)$ 分别为 t 时刻上下桥臂需要投入的子模块数量;下标 n 和 p 分别表示下桥臂与上桥臂; $u_j^*(t)$ 为阀侧 j 相调制波的瞬时值; N 为桥臂子模块数量; $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数; U_{ct} 为子模块的直流电压时间平均值,通过控制上下桥臂投入子模块数量,使输出电压尽可能地逼近调制波。

多端直流输电控制系统(multi-terminal DC transmission control system, MTDC)是在两端柔性

直流输电的基础上发展起来的,其由3个或3个以上的换流器组成,控制满足 $N-1$ 原则。MTDC基本控制原理可以类比MMC-HVDC,但由于需要考虑各站之间的任务分配与功率协调,控制难度上较MMC-HVDC有较大提升^[31-33],多端直流系统的示意图如图1所示。

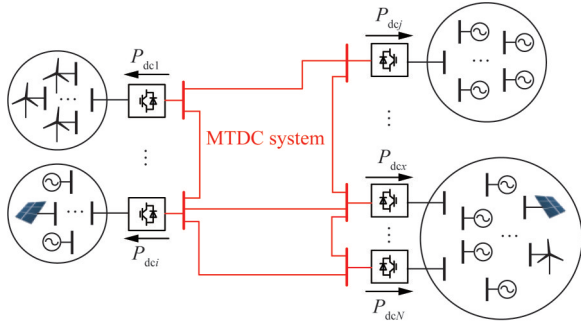


图1 多端直流输电示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-terminal DC transmission

2 MMC等效惯性时间常数的理论基础

在物理学上,惯量是物体抵抗角速度变化的物理量,它是物体转动惯性的度量。在物理学中,惯量通常指的是转动惯量,转动惯量越大,物体抵抗角速度变化的能力越强,即越难改变其转动状态。电力系统惯性指系统在受到扰动时,阻止系统发生突变的能力,有利于控制部分对系统的调节作用,更快达到平衡。惯性时间常数能够反映系统的惯性大小。

交流系统同步发电机的惯性时间常数定义为转子储存的动能与额定容量之比,对应交流系统阻止频率突变的能力,其惯性时间常数 H_G 可表示为:

$$H_G = \frac{E_{\text{gen}}}{S_{\text{gen}}} = \frac{Jw_{\text{ref}}^2}{2S_{\text{gen}}} \quad (3)$$

式中: E_{gen} 为同步发电机转子储存的动能; J 为同步发电机惯性时间常数; w_{ref} 为转子转动的角频率; S_{gen} 为发电机额定容量。

有研究表明,可以将MMC等效惯性时间常数的理论与同步发电机的惯性时间常数的定义进行类比^[34]。直流系统中的惯性时间常数对应了其阻止电压突变的能力。对于直流换流站的MMC,其能量储存在桥臂电容中,每个子模块储存的能量 W_{SM} 可以表示为:

$$W_{\text{SM}} = \frac{1}{2} C_0 U_c^2 \quad (4)$$

式中: C_0 为子模块的电容; U_c 为子模块电容电压。

类比同步发电机,通过各个桥臂电容得到MMC等效惯性时间常数 H_{mmc} 通用定量表达式为:

$$H_{\text{mmc}} = \frac{\sum_{n=1}^{6N} W_{\text{SM},n}}{S_{\text{mmc}}} = \frac{3N \cdot C_0 U_c^2}{S_{\text{mmc}}} \quad (5)$$

式中: $W_{\text{SM},n}$ 为第 n 个子模块储存的能量; S_{mmc} 为换流站的容量。故本文选择从MMC子模块数量与电容两方面研究系统惯性提升方法。

3 基于惯量控制的直流系统动态性能提升方法

为提升直流系统的动态性能,本文采用等效子模块数量的实际电容与虚拟电容电感的两种策略。

3.1 基于MMC等效子模块数量的惯量控制方法

MMC每个子模块包含一个电容器。MMC的正常运行依赖于子模块电容的投入与切除。在子模块电容处于切除状态时,其被旁路出主电路,不能提供惯性支持。由式(5)可知,只有子模块电容投入时,才能使 H_{mmc} 增大,对系统的扰动有平抑作用。

在本策略中,对 N 的定义与常规定义有不同,将 N 看作一个可控的变量,设为 N_{mmc} 。MMC直流电压 U_{dc} 与子模块电容电压 U_c 之间的关系为:

$$U_c = \frac{U_{\text{dc}}}{n_{pj} + n_{nj}} = \frac{U_{\text{dc}}}{N} \quad (6)$$

根据差模、共模电压与上下桥臂之间的电压关系,将(6)代入式(1)和(2)中可以推出:

$$n_{nj}(t) = \text{round} \left[\frac{N \left(\frac{1}{2} U_{\text{dcN}} + u_{vj}^*(t) \right)}{U_{\text{dcN}}} \right] \quad (7)$$

$$n_{pj}(t) = \text{round} \left[\frac{N \left(\frac{1}{2} U_{\text{dcN}} - u_{vj}^*(t) \right)}{U_{\text{dcN}}} \right] \quad (8)$$

式中: $u_{vj}^*(t)$ 为 t 时刻调制波的瞬时值; U_{dcN} 为直流电压的额定值。由式(5)可知,MMC的等效惯性时间常数与其每相投入的子模块数量 N 有关。因此, N_{mmc} 可表示为直流扰动的函数,即:

$$N_{\text{mmc}} = f(\Delta U_{\text{dc}}, \Delta I_{\text{dc}}) \quad (9)$$

式中: ΔU_{dc} 为直流电压变化量; ΔI_{dc} 为直流电流变化量。

式中: $W_{\Sigma 0}^*$ 为 MMC 子模块电容初始能量; $v_{\Sigma \text{cpj}}$ 、 $v_{\Sigma \text{cnj}}$ 分别为上下桥臂子模块电压之和; C_{vc} 为本文所设定的虚拟电容; $W_{\Sigma 0}^*$ 为不含虚拟电容的情况下原本储存的能量。假设 $W_{\Sigma} \approx W_{\Sigma 0}^*$, 将式(11)~(14)联立得到式(15)^[35]:

$$P_1 - P_{ac} = \frac{1}{2} (C_{dc} + C_{vc}) \frac{dU_{dc}^2}{dt} \quad (15)$$

由式(15)可知,该策略引入一个并联在直流侧的虚拟可调电容,平抑直流系统的强交互作用,为直流系统提供相应的惯性支撑。加入虚拟电容控制后,换流站的惯性时间常数 H_{mmc} 可以表示为:

$$H_{mmc} = \frac{3NC_0U_c^2 + \frac{1}{2}C_{vc}\Delta U_{dc}^2}{S_{mmc}} \quad (16)$$

通过分析得到虚拟电容充放电功率 ΔP 表示为:

$$\Delta P = \frac{1}{2} C_{vc} \frac{d\Delta U_{dc}^2}{dt} \quad (17)$$

由(17)可知,虚拟电容控制策略是基于直流电压或功率的改变而发挥作用,其作用于MMC的外环控制回路,将功率增量或电压增量加入外环功率控制的参考值,从而起到惯量支撑的作用。

若换流器采用定有功功率控制或下垂控制,其交流有功功率参考值 P^* 满足式(18)。

$$P^* = P_{acref} + \Delta P = P_{acref} + \frac{1}{2} C_{vc} \frac{d\Delta U_{dc}^2}{dt} \quad (18)$$

式中 P_{acref} 为原有有功功率参考值。

根据式(17)~(18)能够绘制出含虚拟电容控制策略的控制框图如图4所示。

当系统受到扰动时, ΔP 不为0,虚拟电容提升

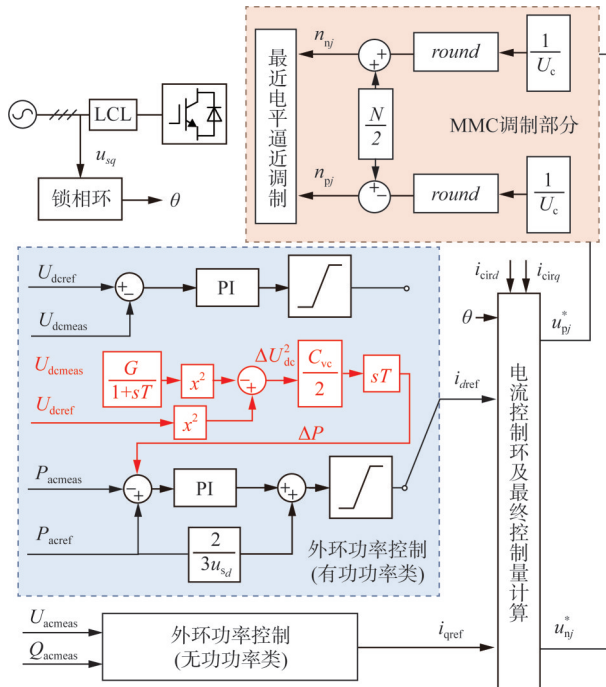


图4 基于虚拟电容的控制策略框图

Fig. 4 Block diagram of control strategy based on virtual capacitors

直流侧电容,通过虚拟充放电得到功率增量来提升系统的惯量。当系统回到稳态时, U_{dcmeas} 与 U_{dcref} 的值相等,此时 ΔP 为0,虚拟电容仅作用于系统受到扰动的过程,对系统的稳态值没有影响。若系统换流站采用定直流电压控制,将含虚拟电容的电压增量引入电压参考值,控制遵循式(19)。

$$(U_{dc}^*)^2 = U_{dcref}^2 + \Delta U_{dc}^2 = U_{dcref}^2 + \frac{2\Delta P}{C_{vc}s} \quad (19)$$

式中 s 为拉普拉斯算子。

系统也可以采用虚拟电感的方式来提升惯量,原理同虚拟电容控制策略,虚拟电感与虚拟电容的不同点在于虚拟电感作用于外环功率控制的直流电压控制部分,受扰动影响期间直流电压参考值 U_L^* 遵循式(20)。

$$U_L^* = U_{dcref} + \Delta U = U_{dcref} + \frac{1}{2} L_{vc} \frac{dI_{dc}^2}{dt} \quad (20)$$

式中: ΔU 为参考值增量; L_{vc} 为虚拟电感值; I_{dc} 为直流电流。根据式(20)能够绘制出含虚拟电感控制策略的控制框图如图5所示。

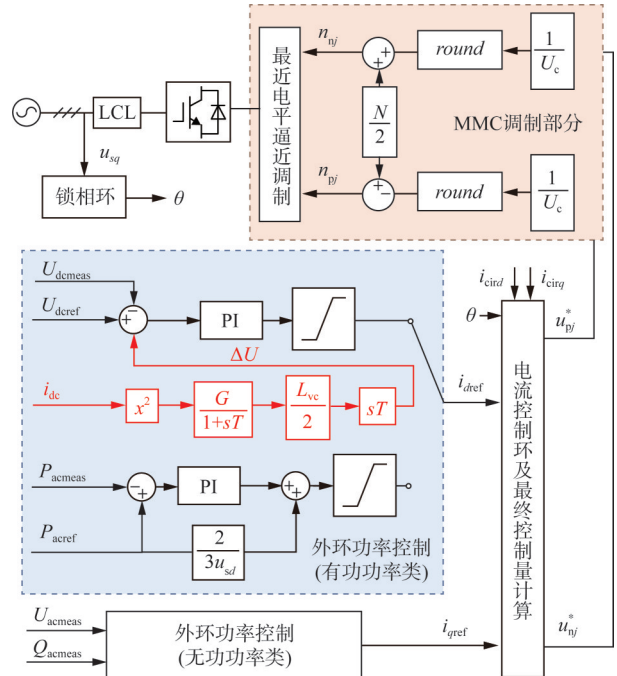


图5 基于虚拟电感的控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of control strategy based on virtual inductance

3.3 多端柔性直流系统惯量综合控制策略

为了进一步提升直流系统的动态性能,考虑将两种控制策略进行叠加的可行性。两种方法的叠加

使用了前文提到的式子作为理论基础。多端柔性直流系统惯量综合控制策略控制框图如图 6 所示。

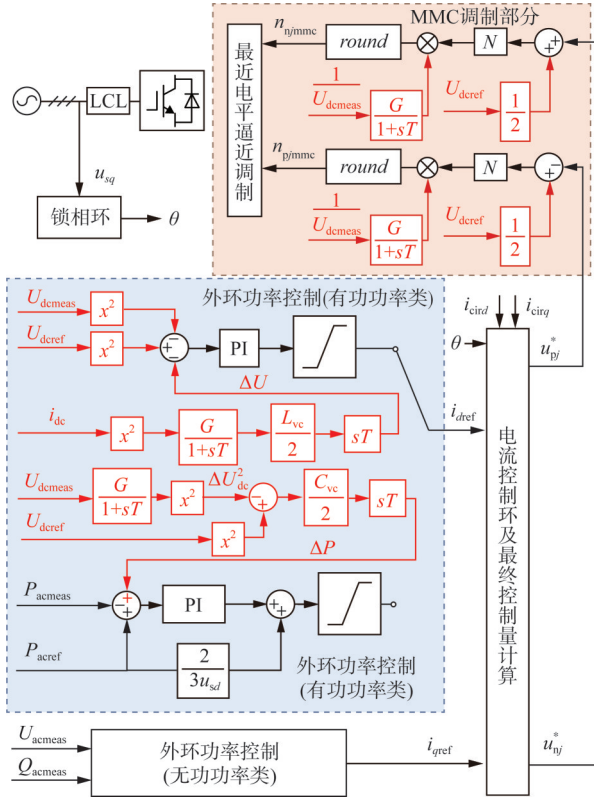


图 6 多端柔性直流系统惯量综合控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of inertia integrated control strategy for multi-terminal flexible DC system

二者之间的不同点在于他们作用在 MMC 柔性直流输电中不同的控制部分, 即强调基于等效子模块数量的控制策略作用环节是换流器的调制模块, 而基于虚拟储能元件的控制策略作用环节是换流器外环功率控制的有功功率类控制回路。且由文献[36]可得, 外环功率控制部分与最近电平逼近调制部分的带宽相差一个数量级以上, 在常规控制中二者没有直接的互相影响, 因此为叠加使用提供基础。

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建在运的南澳三端柔性直流系统, 如图 7 所示。其主回路主要参数如表 1 所示。

0.8 s 时, 将送端金牛换流器的有功功率参考值从 0 p. u. 跃变为 1.5 p. u., 受到扰动后, 直流电压下降, 三端功率重新分配。将基于等效子模块数与虚拟储能元件的控制策略分别加入受到如上扰动

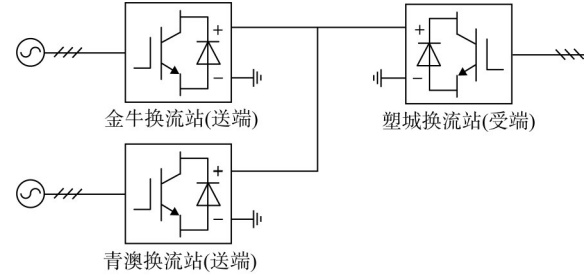


图 7 仿真使用的多端系统

Fig. 7 Simulation of the multi-terminal system used

表 1 仿真系统主回路参数

Tab. 1 Simulate the main loop parameters of the system

电气量	塑城(受端)	金牛(送端)	青澳(送端)
额定容量/MVA	200	100	50
额定直流电压/kV	±160	±160	±160
每桥臂子模块数	134	200	200
子模块电容/μF	5 000	2 500	1 400
子模块投切周期/μs	100	100	100
桥臂电感/mH	100	180	360
变压器变比/kV	110/166	110/166	110/166
变压器容量/MVA	240	120	60
变压器型式	三相双绕组	三相双绕组	三相双绕组
额定交流电压/kV	110	110	110
有功类控制方式	定直流电压	定有功功率	定有功功率

的系统, 再与无控制策略的系统对比, 验证上述方法的有效性。在仿真模型中, 运用文献[37]的桥臂戴维南等效, 对仿真进行简化, 缩短仿真时间, 提升效率。

在不加入控制策略时, 根据式(5)送受端换流器的等效惯性时间常数如表 2 所示。

表 2 送受端换流器等效惯性时间常数

Tab. 2 Equivalent inertia time constant of the sending and

	receiving end converters			ms
参数名称	塑城(受端)	金牛(送端)	青澳(送端)	
等效惯性时间常数	57.3	38.4	43.0	

4.1 基于 MMC 等效子模块数的惯量控制方法的仿真验证

图 8 展示了无控制策略、单独加入基于 MMC 等效子模块数的控制策略的两种仿真实验的仿真结果。本文选择对直流电压和未直接输入扰动的青澳换流站的有功功率随时间的变化进行仿真, 截取扰动开始至扰动结束的数据分析, 直流电压用标么值表示。

由图 8 可知, 不加入控制策略时, 受扰动后,

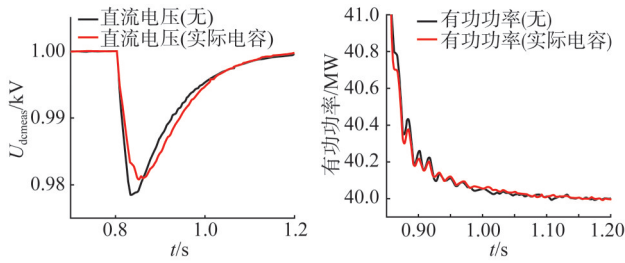


图8 基于MMC等效子模块数的惯量控制方法对直流电压扰动和有功功率的平抑效果

Fig. 8 The effect of the inertia control method based on MMC equivalent sub-module number on DC voltage and active power disturbance

直流电压的最低值为 0.978 3 p. u. , 基于 MMC 等效子模块数的惯量控制方法能够将直流电压最低值平抑为 0.980 8 p. u. , 且能够让有功功率更快接近稳态值, 但缺少使系统更快进入稳态的效果, 该策略对直流电压的扰动平抑效果更优。

在基于 MMC 等效子模块数的惯量控制方法投入期间, 投入的子模块数量不会改变, 但等效子模块数与受扰动期间每时刻的直流电压的测量值以及调制波的瞬时值有关, 并不是一个固定的值, 仿真得到等效子模块数的变化曲线图如图 9 所示。

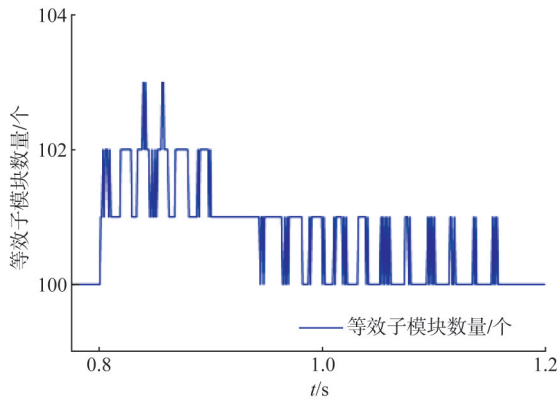


图9 等效子模块数量随时间变化曲线图

Fig. 9 Curve of equivalent sub-module number varying

由图 9 可知, 等效子模块数量最高可提升为 103, 提升“实际电容值”即为子模块数量与子模块电容值之积, 由于该方法仅作用于 MMC 的调制部分, 所以不涉及能量变化的问题。

4.2 基于虚拟储能元件控制的惯量控制方法的仿真验证

首先对虚拟电容与虚拟电感的取值进行说明, 虚拟元件的取值过小会导致平移扰动效果不明显,

而虚拟电容过大会造成功率调节的超调量过大, 引起系统失稳, 因此需要将二者进行协调。经过仿真扫描并结合文献[38]确定本文虚拟电容值为 0.008 F, 虚拟电感值为 1 H。

在 3.3 节中已经说明综合控制策略的可行性, 首先在青澳换流站中对多端柔性直流系统惯量综合控制策略的直流电压参考值增量 ΔU 和有功功率参考值增量 ΔP 的数值变化进行仿真, 从实验结果上验证 3.2 节分析的正确性, 具体如图 10 所示。

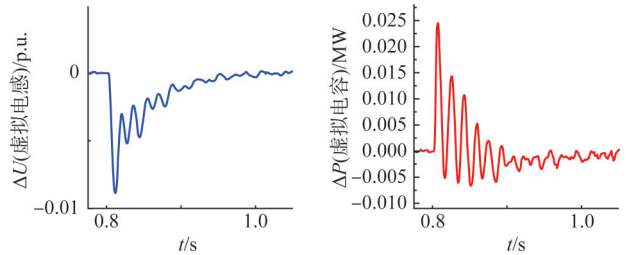


图10 基于虚拟储能元件的控制策略中 ΔU 与 ΔP 的变化

Fig. 10 Variation of ΔU and ΔP in the control strategy based on virtual energy storage elements.

由图 10 可知, ΔU 绝对值的最大值可达到 0.009 p. u. , ΔP 最大值可达到 0.024 6 MW, 扰动开始后, 虚拟电容与电感通过作用于外环功率控制, 改变直流电压与有功功率的参考值, 而在扰动结束后, ΔU 与 ΔP 重新归零, 不影响系统的正常稳定运行状态。

图 11 展示了无控制策略、单独加入虚拟储能元件控制策略的两种仿真实验的结果, 同理选择对直流电压及青澳换流站的有功功率进行仿真, 截取扰动开始至扰动结束的数据进行分析, 电气量用标幺值进行表示。

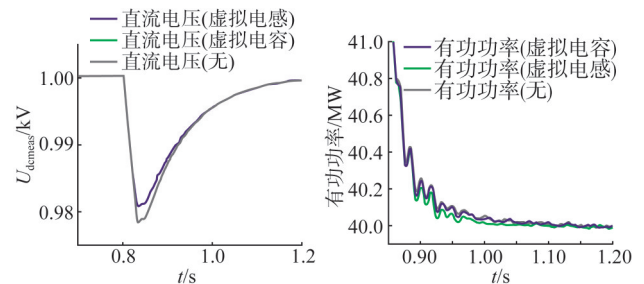


图11 基于虚拟储能元件控制的惯量控制方法对直流电压和有功功率扰动的平抑效果

Fig. 11 Suppression effect of the inertia control method based on virtual energy storage element control on DC voltage and active power disturbance

由图 11 可知, 在虚拟电容作用的有功功率部分和虚拟电感作用的直流电压部分, 基于虚拟电容的惯量控制方法能够使有功功率更迅速地达到稳态值, 相比于无控制策略, 其无误差调节时间快 0.07 s, 其对抗扰的平抑效果优于实际电容, 基于虚拟电感的惯量控制方法将直流电压最低值平抑为 0.980 8 p. u., 虚拟电容和虚拟电感分别在有功功率和直流电压上有较好的平抑效果, 但受限与外环功率控制只能在直流电压与有功功率二者中只能选择其一进行控制, 同一换流站中不能够使用虚拟储能元件的方法同时平抑直流电压和有功功率的扰动。

4.3 多端柔性直流系统惯量综合控制策略仿真验证

为了证明综合控制策略的效果, 将其与以上两种策略进行比较, 得到对比如图 12 所示。

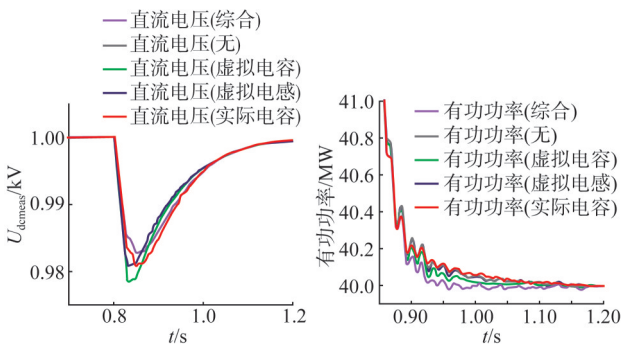


图 12 多端柔性直流系统惯量综合控制策略在平抑有功功率扰动上的比较

Fig. 12 Comparison of inertia integrated control strategies for multi-terminal flexible DC systems in suppressing active power disturbances

可以看出, 多端柔性直流系统惯量综合控制策略使系统直流电压受到扰动时的最低值为 0.982 7 p. u., 在有功功率方面无误差调节时间比无控制策略早 0.17 s。

综上所述, 单独使用控制策略与综合控制策略所能平抑直流电压、有功功率数值如表 3 所示。

表 3 各策略平抑直流电压及有功功率效果

Tab. 3 Effectiveness of each strategy in smoothing the DC voltage and active power			
平抑参数	实际电容	虚拟储能元件	综合控制
直流电压/p. u.	0.002 5	0.002 4	0.004 4
功率无误差调节时间/s	0	-0.07	-0.17

通过表 3 可知, 综合控制策略与单独施加任意策略相比均有较为显著的提升, 其结合了各种策略单独施加的优势, 在直流电压和有功功率上都有显著的扰动平抑作用且在有功功率上能够使系统无误差调节时间大幅缩减, 从而可以得知, 多端柔性直流系统惯量综合控制策略能够最大程度达到提升惯量的效果。

由上述直流电压和有功功率的平抑值能够表征等效惯性时间常数的提升, 为进一步对综合控制策略的有效性进行定量的证明, 依据式(5)能够得到施加惯量综合控制策略时的等效惯性时间常数, 取受扰动中的最大等效惯性时间常数, 如表 4 所示。

表 4 等效惯性时间常数对比

Tab. 4 Comparison of the equivalent inertia time constant		
		ms
换流站	无控制策略	综合控制策略
塑城换流站	57.3	58.5
金牛换流站	38.4	40.5
青澳换流站	43.0	46.5

从而得知, 综合控制策略对 3 个换流站的等效惯性时间常数均有提升, 从而能够使系统更迅速地平抑扰动。

而对于其他方面性能, 如直流调制功能中的直流功率部分, 综合控制策略并不会影响其调节性能, 在系统受到扰动及功率重新分配后, 直流功率 (P_{acmeas}) 的波形如图 13 所示。

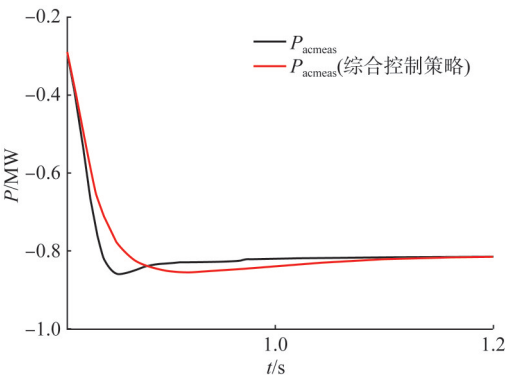


图 13 直流功率波形

Fig. 13 Waveforms of DC power

由图 13 可知, 使用综合控制策略对直流功率没有负面作用, 而能够起到积极效果, 综合控制策略能够使直流功率波动更加平滑, 在直流调制功能

上也有一定的扰动平抑作用。

5 结论

为增加MMC等效惯性时间常数,提升动态性能的效果,本文提出了基于惯量提升控制的直流系统动态性能改善方法,通过仿真验证得到以下结论。

1)基于MMC额外子模块数量的惯量控制方法能够通过等效地增大系统处于投入状态的子模块数量来模拟电容的投入与切除,从而在扰动状态内提升MMC能量。基于虚拟储能元件控制的惯量控制方法通过有功功率或电压的差值,模拟额外加入到直流侧的虚拟电容,通过它的能量变化能够提升MMC等效惯性时间常数。

2)实际电容作用在MMC的调制部分,虚拟电容作用在MMC的外环功率控制部分,两者可以进行叠加使用,多端柔性直流系统惯量综合控制策略结合了两端单独使用的优势,能够更大程度地对惯性起到支撑作用且不改变系统的稳态值。

参考文献

- [1] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [2] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等.中国未来电网的发展模式和关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [3] 冀肖彤,杨东俊,方仍存,等.“双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J].电力建设,2024,45(2):37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [4] 陈图南,李文萱,李云,等.“双碳”背景下碳-绿证-电力市场耦合机制综述[J].广东电力,2024,37(8):14-25.
CHEN Tunan, LI Wenxuan, LI Yun, et al. Review on coupling mechanism of carbon, green certificate and power market under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(8): 14-25.
- [5] 徐政,张哲任,肖晔庆.基于子模块级联型换流器的柔性输电系统[M].北京:机械工业出版社,2025.
- [6] 李霞林,郭力,黄迪,等.直流配电网运行控制关键技术研究综述[J].高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [7] AGBEMUKO A J, DOMÍNGUEZ-GARCÍA J L, PRIETO-ARAUJO E, et al. Dynamic modelling and interaction analysis of multi-terminal VSC-HVDC grids through an impedance-based approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019(113): 874-887.
- [8] 高磊,张慧媛,许军,等.海上柔性直流输电系统的宽频带振荡非同时性研究[J].电测与仪表,2024,61(7):50-56.
GAO Lei, ZHANG Huiyuan, XU Jun, et al. Asynchronous characteristics research of wideband oscillation in offshore windfarms connected to MMC-HVDC [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(7): 50-56.
- [9] SINGH S, GAUTAM A R, FULWANI D. Constant power loads and their effects in DC distributed power systems: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(72): 407-421.
- [10] 李云丰,汤广福,吴亚楠,等.直流电网建模分析与阻尼控制研究[J].中国电机工程学报,2017,37(12):3372-3382,3364.
LI Yunfeng, TANG Guangfu, WU Yanan, et al. Modeling, analysis and damping control of DC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3372-3382, 3364.
- [11] 郑凯元,杜文娟,王海风.聚合恒功率负荷对直流微电网稳定性影响的阻抗法分析[J].电网技术,2021,45(1):134-148.
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. DC microgrid stability affected by aggregated constant power loads based on impedance method [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 134-148.
- [12] 朱博,徐攀腾,王晓雪,等.基于混合型MMC的柔性直流电网故障电流阻断控制策略[J].高压电器,2024,60(6):148-155.
ZHU Bo, XU Panteng, WANG Xiaoxue, et al. Fault current blocking control strategy for DC grid based on hybrid MMC [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 148-155.
- [13] 黄伟煌,李明,郭铸,等.基于小干扰稳定性的多端混合高压直流输电系统控制参数分析与优化方法[J].电网技术,2020,44(8):2941-2949.
HUANG Weihuang, LI Ming, GUO Zhu, et al. Control parameter analysis and optimization method of multi-terminal hybrid HVDC transmission system based on small signal stability [J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2941-2949.
- [14] 朱琳,赵学深,郭力,等.计及换流器间动态交互的中压直流配电系统控制参数设计[J].电力系统自动化,2022,46(3):121-128.
ZHU Lin, ZHAO Xueshen, GUO Li, et al. Control parameter design of medium-voltage DC distribution system considering dynamic interaction between converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 121-128.
- [15] CHEN P, ZHAO W, CHEN X, et al. An impedance-based parameter design method for active damping of load converter station in MTDC distribution system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1423-1436.
- [16] FU Q, DU W, WANG H, et al. Small-signal stability analysis of a VSC-MTDC system for investigating DC voltage oscillation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5081-5091.
- [17] 杨洁,刘开培,饶雪,等.多端柔性直流输电系统小信号建模

- [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4015–4024.
- YANG Jie, LIU Kaipei, RAO Xue, et al. Small Signal Modeling for VSC-MTDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4015–4024.
- [18] WANG C, LI X, GUO L, et al. A nonlinear-disturbance-observer-based DC-bus voltage control for a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6162–6177.
- [19] LI X, GUO L, ZHANG S, et al. Observer-based DC voltage droop and current feed-forward control of a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5207–5216.
- [20] WANG X, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources-an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020(1): 115–134.
- [21] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1–9.
- ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1–9.
- [22] ZAJA M, JOVICIC D. Electronically controlled capacitive energy storage element for DC grids[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019(113): 129–138.
- [23] XU Y, ZHANG Z, WANG G, et al. Modular multilevel converter with embedded energy storage for bidirectional fault isolation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(1): 105–115.
- [24] 贺铿, 李勇, 曹一家, 等. 考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 101–110.
- HE Li, LI Yong, CAO Yijia, et al. Flexible voltage control strategy of DC distribution network considering distributed energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 101–110.
- [25] 朱晓荣, 蔡杰, 王毅, 等. 风储直流微网虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 49–58.
- ZHU Xiaorong, CAI Jie, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49–58.
- [26] XU G, XU L, MORROW D J, et al. Coordinated DC voltage control of wind turbine with embedded energy storage system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 1036–1045.
- [27] HUI S Y, LEE C K, WU F F. Electric springs—a new smart grid technology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1552–1561.
- [28] LEE C K, HUI S Y. Reduction of energy storage requirements in future smart grid using electric springs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1282–1288.
- [29] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 基于直流电气弹簧的直流配电网电压波动抑制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 23–31.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. DC electric spring for voltage fluctuation suppressing of DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 23–31.
- [30] 薛花, 张珂宁, 王凯, 等. 基于能量函数塑形的直流微电网多电力弹簧电压平穩控制方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(10): 96–108.
- XUE Hua, ZHANG Kening, WANG Kai, et al. Voltage regulation control method of multiple electric springs in DC microgrid based on energy function shaping[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 96–108.
- [31] 阳岳希, 杨杰, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 120–124, 157.
- YANG Yuexi, YANG Jie, HE Zhiyuan, et al. Control strategy of MMC based back-to-back HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 120–124, 157.
- [32] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 考虑模块冗余和系统状态的多端柔性直流输电系统可靠性的蒙特卡洛分析[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 333–342.
- LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. Monte Carlo analysis of reliability of MMC-MTDC considering module redundancy and system state[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 333–342.
- [33] 刘英培, 谢乾, 梁海平. 柔性直流输电系统自适应虚拟惯性调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 129–136.
- LIU Yingpei, XIE Qian, LIANG Haiping. Frequency regulation control strategy for flexible DC transmission system based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 129–136.
- [34] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [35] SHINODA K, BENCHAI B A, DAI J, et al. Virtual capacitor control: mitigation of DC voltage fluctuations in MMC-based HVDC Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 455–465.
- [36] 王燕宁, 郭春义, 杨硕, 等. MMC 系统稳定裕度随内环电流控制带宽的非单调变化特性及机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3538–3548.
- WANG Yanning, GUO Chunyi, YANG Shuo, et al. Non-monotonic characteristics of stability margin of MMC system with the change of inner loop current control bandwidth and its mechanism analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3538–3548.
- [37] 朱琼海, 肖晃庆. 基于模块化多电平换流器的超级电容储能系统高效仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 185–191.
- ZHU Qionghai, XIAO Huangqing. Efficient simulation method for modular multilevel converter with embedded super capacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 185–191.
- [38] SAMIMI S, GRUSON F, DELARUE P, et al. MMC stored energy participation to the DC bus voltage control in an HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1710–1718.

收稿日期: 2025-04-02; 网络首发日期: 2025-09-01

作者简介:

张利东(1969), 男, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为直流输电和构网型控制技术, zhangld4@csg.cn;

李一畅(2002), 女, 硕士研究生, 研究方向为储能 MMC 拓扑及控制技术, 202421015090@mail.scut.edu.cn;

肖晃庆(1990), 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为直流输电、新能源并网技术、电力系统稳定性分析与控制, xiaohq@scut.edu.cn。