

基于投旁通对策略的组合式 C-MMC 单元投退控制

薛英林¹, 赵 峥¹, 葛风雷², 张哲任³

(1. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209; 2. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 220005;
3. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 采用换流单元串并联的组合式基于箝位双子模块的模块化多电平换流器(C-MMC)是柔性直流系统实现高压大容量输电的有效途径。针对工程实际中如何完成换流单元在线投退的问题, 首先将换流单元的投退过程分为并联类和串联类 2 种基本模式, 讨论了投退过程存在的技术难点。其次, 设计了旁路开关和隔离开关的配置方案以及箝位双子模块串接电阻的限流方案。然后, 重点针对串联类单元投退, 提出了一种基于投旁通对的控制策略。其核心思想是单元投退过程中以某一相桥臂为旁通对同时闭锁剩余两相桥臂, 使得直流电流在换流单元和旁路开关间平稳转移; 桥臂闭锁期间箝位二极管所串联的电阻有效抑制充电电流, 减少模块电容电压的上升幅值。PSCAD/EMTDC 仿真结果验证了所提方案的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 箝位双子模块; 桥臂闭锁; 阻尼电阻; 控制

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.012

0 引言

相较于早期两电平、三电平换流器, 采用功率单元级联技术的模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 具有诸多优势^[1-5]: 制造难度下降、安装维护简单、输出波形质量高、运行损耗低等。采用 MMC 作为换流器拓扑, 已成为柔性直流输电系统最主流的趋势^[6-7]。

目前柔性直流系统主要应用在风电并网、海岛送电和城市增容等场合, 在大容量架空线方面却鲜有应用。这一方面是因为输送容量难以与传统直流相媲美。现阶段传统特高压直流工程可输送 8 000 MW, 而世界上容量最大的柔性直流工程是大连两端柔性直流工程^[8]以及法国和西班牙的 INELFE 联网工程^[9], 单个换流器容量仅为 1 000 MW。通过增加桥臂内串联的子模块数量, 可以提升 MMC 的功率容量和电压等级, 但是这样会给数据检测、采集和通信等造成很大的负担; 此外, MMC 的最大输送功率受制于换流变压器的容量。另一方面是因为直流线路故障难以快速地清除。早期的 MMC 采用的功率单元是半桥结构的子模块, 在直流故障期间交流系统会通过 IGBT 反并联二极管向故障点持续馈能, 所以该拓扑不具备自主切除故障电流的能力^[10-11]。

为使柔性直流输电系统拓展到大容量架空线领域, 文献[1, 12]提出了 2 点基本解决方法: 利用 MMC 换流单元串并联技术, 即采用组合式换流器来增加系统输送容量; 采用具有直流故障自清理能力的换流器拓扑。在拓扑配置上可有多种选择, 如结

合两电平和 MMC 运行特点的桥臂交替导通多电平换流器^[13-14]和混合级联多电平换流器^[15-16], 采用全桥子模块^[17]或箝位双子模块 CDSM (Clamp Double SubModule) 的 MMC (后者简称为 C-MMC)^[18-22]。其中, C-MMC 由于具有所需器件少、运行损耗低等特点, 逐渐得到青睐。

本文所研究对象是组合式 C-MMC, 其换流单元构成网格格式组合形式, 各单元可独立控制, 运行方式灵活多变。某个换流单元投入或退出运行, 对系统协调和设备配合提出要求。为此, 本文重点对换流单元解锁/闭锁特性进行了分析, 并设计了一套换流单元投切策略和设备动作配合时序, 以保障换流单元投退时系统能够稳定运行。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了相应平台, 并对所设计控制策略进行分析验证。

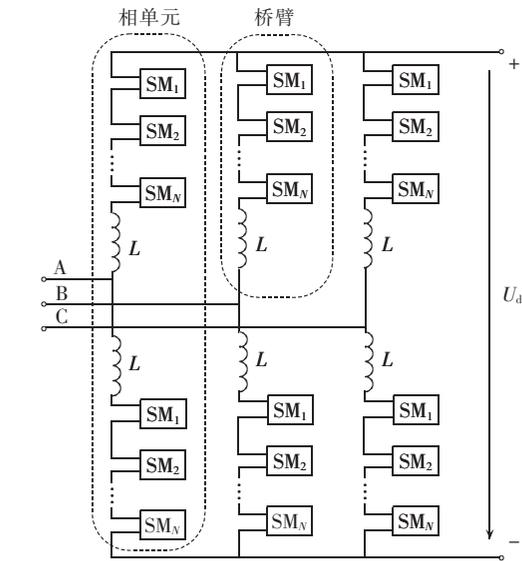
1 组合式 C-MMC 的结构特点和构成形式

1.1 C-MMC 换流单元的拓扑特点

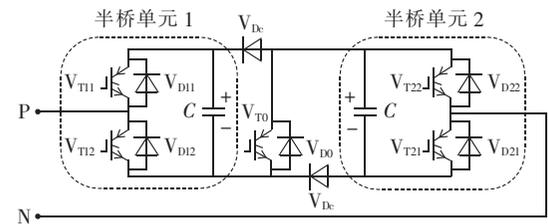
C-MMC 拓扑结构如图 1(a)所示, 包括 3 个相单元, 每个相单元由上、下 2 个桥臂组成, 每个桥臂由 N 个箝位双子模块级联而成, 同时串联缓冲电抗 L 以抑制环流和故障电流上升率。如图 1(b)所示, 箝位双子模块由 2 个半桥单元经 2 个箝位二极管 V_{Dc} 和一个带续流二极管的引导 IGBT (V_{T0}, V_{D0}) 串并联构成。为提高子模块切除故障电流的能力, 文献[20]提出了改进型子模块拓扑, 在箝位二极管回路串联阻尼电阻, 以加快闭锁期间能量耗散, 如图 1(c)所示, 本文采用该型子模块。

1.2 C-MMC 换流单元的基本运行机理

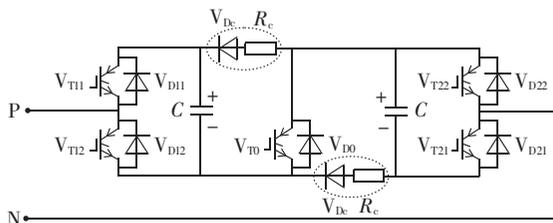
正常运行时 C-MMC 与基于半桥子模块的 MMC



(a) 三相 MMC 拓扑



(b) 子模块结构



(c) 改进拓扑

图 1 C-MMC 换流单元的拓扑结构

Fig.1 Topology of C-MMC unit

稳态特性一致。此时,子模块中引导 IGBT 一直导通,故一个 CDSM 可以等效为 2 个串联的半桥子模块,输出电压有 $0, U_c, 2U_c$ (其中 U_c 为子模块电容电压) 3 种,如图 2 所示。这样,每桥臂 N 个 CDSM 的

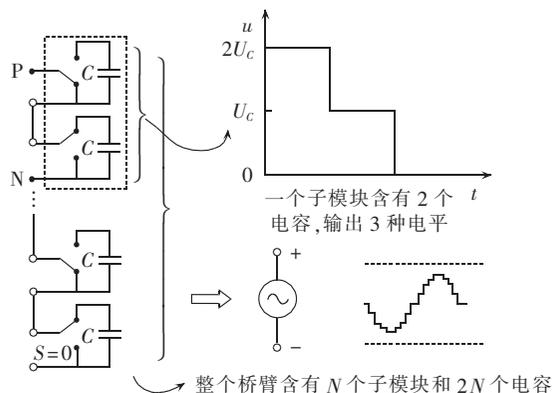


图 2 C-MMC 稳态运行特性

Fig.2 Steady-state operating characteristics of C-MMC

C-MMC 可移植每桥臂 $2N$ 个半桥子模块的 MMC 控制策略。各子模块电容按正弦规律依次投入和切除,构成换流器交直流出口处所需电压波形,桥臂输出电压特性等效为受控基波电压源。稳态时 MMC 数学模型和控制策略可参照文献[3-5],此处不再赘述。这里特别指出一种子模块运行模式,当 V_{T11}, V_{T22} 闭锁, V_{T12}, V_{T21}, V_{T0} 开通时,子模块处于旁通状态,此时输出电压为 0,后文控制策略中需要用到这种子模块运行状态。

C-MMC 是 MMC 通过改造子模块内部结构演变而来的,主要区别在于二者闭锁特性的不同。系统闭锁时, CDSM 对外等效为充满电的电容与二极管串联形式,二极管阳极到阴极方向与桥臂电流一致,其中阻尼电阻可起抑制暂态电流的作用,如图 3 所示(图中灰色部分表示断开)。

根据电流方向不同,可以将子模块闭锁模式分

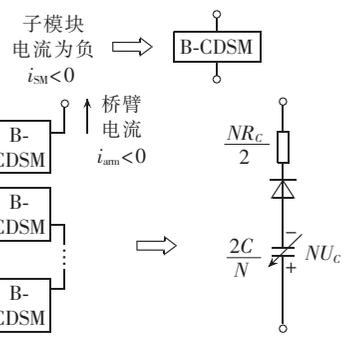
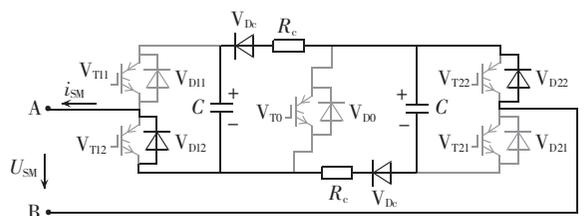
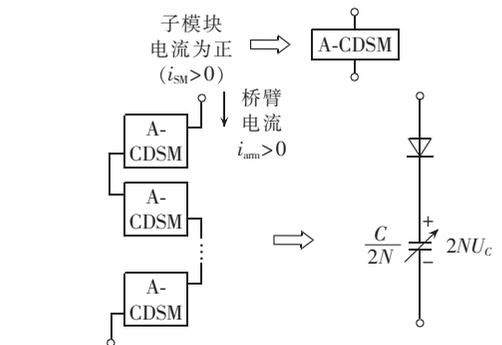
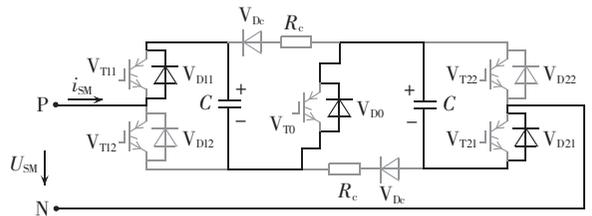


图 3 C-MMC 闭锁特性

Fig.3 Blocking characteristics of C-MMC

为 A 型和 B 型。子模块电压 U_{SM} 、等效电阻 C_{SM} 和等效电阻 R_{SM} 分别由式(1)—(3)确定。闭锁子模块后,桥臂的工作状态有 3 种:模式 A、模式 B 和模式 C(断路)。当桥臂电流为正时,桥臂等效为 N 个处于闭锁模式 A 的子模块级联而成的电路;当桥臂电流为负时,桥臂等效为 N 个处于闭锁模式 B 的子模块级联而成的电路。利用级联模块电容提供的反电势和二极管单向导电特性,可快速切断桥臂电流实现换流单元的闭锁。

$$U_{SM} = \begin{cases} 2U_c & i_{SM} > 0 \\ -U_c & i_{SM} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{SM} = \begin{cases} C/2 & i_{SM} > 0 \\ 2C & i_{SM} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{SM} = \begin{cases} 0 & i_{SM} > 0 \\ 0.5R_c & i_{SM} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

1.3 组合式换流器的基本构成形式

提升 MMC 容量的传统手段主要依靠单纯增加子模块数量,尽管理论上子模块数量可无限增加,但随之而来的问题在于:存在大量 I/O 数据通信和交换,造成控制延时;电容电压平衡策略一般需要对子模块电容电压测量值进行排序,当子模块数目增加后排序所需的计算时间也会大幅增加;控制系统的采样频率需要很高才能识别电平变化;最大输送功率受制于换流变压器的容量,无法达到大容量的要求。

本文采用以 C-MMC 为基本换流单元 BCU(Basic Converter Unit)进行串并联扩展构成组合式换流器的方法,以实现大容量高电压的要求。这样做的优势在于:每个换流单元内子模块个数可以保持在适量范围内,便于控制系统设计和数据通信;通过增加 C-MMC 单元串并联数目来完成电压容量扩展,便于模块化设计;充分利用 C-MMC 的闭锁特性,将大容量柔性直流扩展到架空线应用场合。

组合式换流器的单元扩展方式如图 4 所示,其具

有 4 种基本形式:(1)由 n 个 BCU 串联构成,如图 4(a)所示;(2)由 n 个 BCU 并联构成,如图 4(b)所示;(3)由 n 个 BCU 串联组成支路,再由 k 条支路并联形成由 $n \times k$ 个 BCU 串并联结构,如图 4(c)所示;(4)由 $n \times k$ 个 BCU 构成矩阵形式的网格结构,如图 4(d)所示。第一种方案可实现较高的电压等级,直流线路电流较小,但基本单元投切时会影响整个串联单元回路。第二种方案利用并联方式可方便实现单元扩展,某单元投切时对其他部分影响甚微,但不容易实现高电压等级且输送功率较大时线路电流也较大。第三种方案采取先串后并方式,但串联支路中某单元动作时仍会影响整个支路。第四种方案单元连接方式是网格形式,容易扩展到大容量高电压等级,且单元投退对整个系统影响很小。

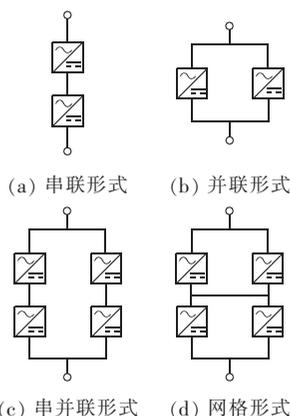


图 4 组合式 C-MMC 单元扩展方式
Fig.4 Unit patterns of combined C-MMC

2 单元投退控制策略和动作时序设计

2.1 换流单元投退分类

不失一般性,以 2×2 网格型组合式 C-MMC 为例,分析其基本的控制原则和单元投退后的运行模式。换流单元分别编号为 ①—④,如图 5 所示(图中未

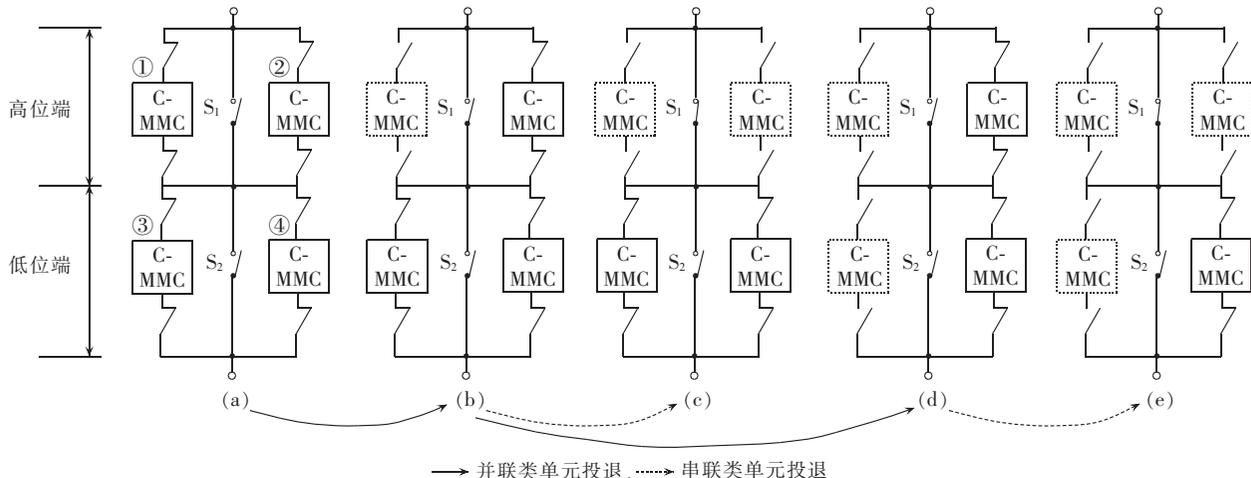


图 5 组合式 C-MMC 单元投退模式
Fig.5 Unit on/off types of combined C-MMC

画出交流端口),该组合式换流器有 2 层:高位端和低位端。

与传统单换流器的柔性直流系统不同,基于组合式换流器的柔性直流系统需要提供类似传统直流所具备的在线投退单元功能^[23]。对于双端系统而言,有 2 种基本投退方式:同步投退,即两端换流器投退相同位置的换流单元;异步投退,即两端换流器投退的换流单元位置不同。两者基本原理一致,本文以同步投退方式进行分析。对于单端 C-MMC 而言,其有 5 种基本运行模式(见图 5):(a)正常运行;(b)1 个单元退出;(c)2 个高位端(或低位端)单元退出;(d)1 个高位端单元和 1 个低位端单元退出;(e)3 个单元退出。为了使得运行损耗降低和防止换流单元稳态电流越限,在运行模式(b)下低位端的 2 个换流单元输送功率为高位端的换流单元的一半;其他控制模式下各单元平均分配输送功率,下同。

为实现交直流系统的单元正常投退和系统不间断运行,每个换流单元需要配置 2 个隔离开关,高位端(低位端)配置旁路开关(S_1 、 S_2),用于旁路相关单元。根据旁路开关是否动作,将单元投退情景分为 2 类:并联类单元投退,如模式(a) \leftrightarrow 模式(b)、模式(b) \leftrightarrow 模式(d)、模式(c) \leftrightarrow 模式(e);串联类单元投退,如模式(b) \leftrightarrow 模式(c)、模式(d) \leftrightarrow 模式(e)。其中符号 \leftrightarrow 表示前后 2 种模式间相互转换。

并联类单元投退的典型特点是不会导致系统直流电压降低,无需旁路开关动作。其退出的基本流程:向直流系统两端待退出换流单元发出闭锁信号,封锁所有 IGBT 触发信号,利用二极管箝位作用,实现换流单元闭锁;跳开待换流单元交流断路器,打开直流输出两侧的隔离开关,彻底隔断交直流系统间的电气连接。

串联类单元投退的典型特点是必须利用旁路开关旁路待退出换流单元并提供直流电流的流动通道,单元退出后会导致系统直流电压下降。串联类单元投退的关键在于如何平稳地使原来通过待退出单元的直流电流转移到旁路开关上。如果不考虑采取措施,直接合上旁路开关,对于待退出单元而言则相当于发生了直流侧出口短路故障,而电容的放电过程会导致短路电流上升迅速^[24-25],可能导致旁路开关损坏。针对上述难点,本文提出了基于投旁通对的串联类单元投退控制策略,以一相作为旁通对同时闭锁剩余两相桥臂,实现了待投退单元的快速旁路。

2.2 投旁通对策略及闭锁等值电路分析

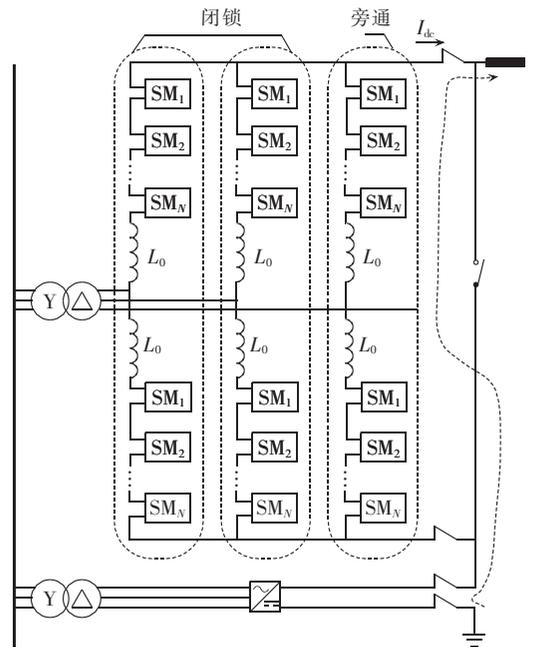
基于投旁通对的单元投退策略核心思想如图 6 所示,包括 3 个阶段:

a. 阶段一,单元投退过程中旁通某一相(以 c 相为例)上、下桥臂,即桥臂内所有子模块处于旁通状态(该相即 c 相上、下桥臂称之为旁通对),同时闭锁另外两相(a、b 相)的上、下桥臂,此时直流电流通过该旁通对维系直流功率的输送;

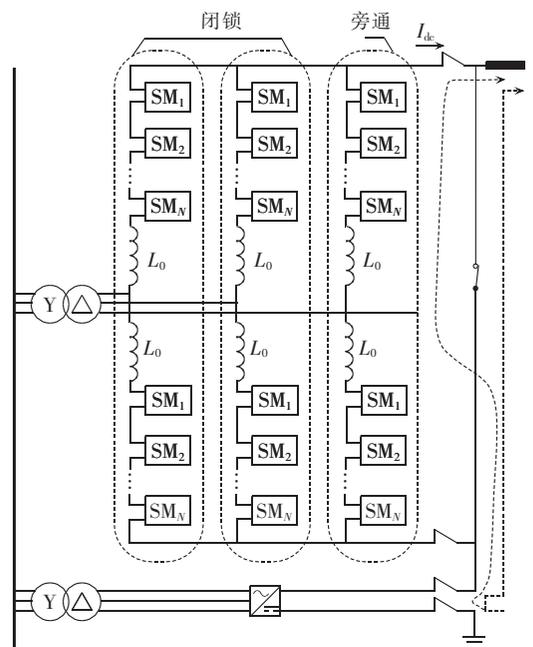
b. 阶段二,旁路开关闭合,此时部分直流电流转移到旁路开关上;

c. 阶段三,闭锁旁通对,则全部的直流电流转移到旁路开关上。

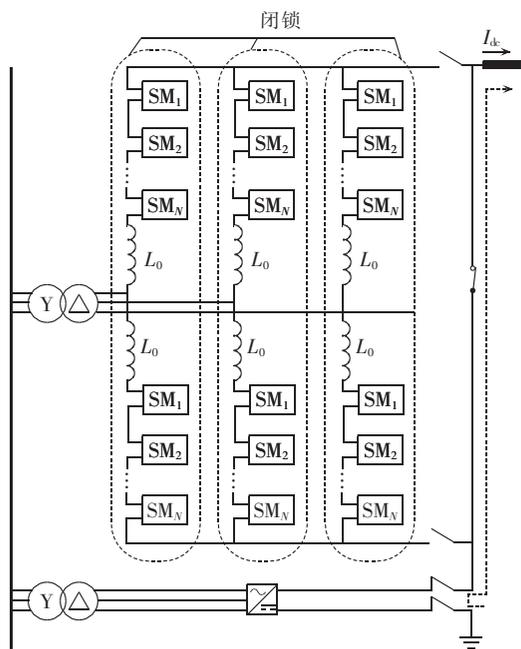
利用上述策略,可以实现直流电流顺利地转移到旁路开关上。从阶段一到阶段三,是基本单元退出的过程,反之,则是单元投入的过程。



(a) 阶段一:投入旁通对



(b) 阶段二:闭合旁路开关



(c) 阶段三: 闭合换流单元

图 6 投旁通对策略示意

Fig.6 Schematic diagram of bypass pair control strategy

此时交流系统馈入待投退 C-MMC 换流单元的潜在通路有 3 条, 以上桥臂为例(如图 7 所示): 经待闭锁两相(a 相和 b 相)上桥臂(或下桥臂)构成的路径①; 经某一闭锁相(a 相或 b 相)和旁通对(c 相)上(或下)桥臂构成的路径②, 且闭锁相桥臂电流为正;

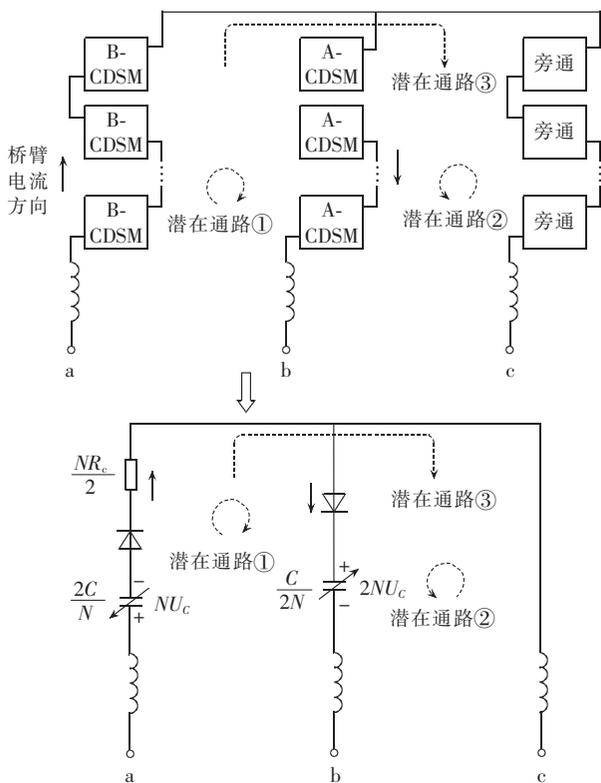


图 7 投旁通对后桥臂电容充电示意

Fig.7 Schematic diagram of arm capacitor charging after switching on bypass pair

经某一闭锁相(a 相或 b 相)和旁通对(c 相)上(或下)桥臂构成的路径③, 且闭锁相桥臂电流为负。保证待投退单元闭锁相桥臂内无电流流通的条件是上述 3 个回路内级联模块电容提供的反电势大于交流线电压幅值, 最终利用二极管反向阻断特性完成闭锁, 即:

$$3NU_c > \sqrt{3} U_{vm} \quad \text{潜在回路①} \quad (4)$$

$$2NU_c > \sqrt{3} U_{vm} \quad \text{潜在回路②} \quad (5)$$

$$NU_c > \sqrt{3} U_{vm} \quad \text{潜在回路③} \quad (6)$$

其中, U_{vm} 为交流相电压峰值。

不考虑冗余, 桥臂级联电容的额定电压 U_{cN} 之和等于换流单元直流侧输出电压 U_d ^[20]:

$$2NU_{cN} = U_d \quad (7)$$

为防止系统进入过调制状态, 电压调制比 M 不能超过 1^[20]:

$$M = \frac{2U_{vm}}{U_d} \leq 1 \quad (8)$$

由于电容电压波动通常在 5% 以下, 近似认为:

$$U_c \approx U_{cN} \quad (9)$$

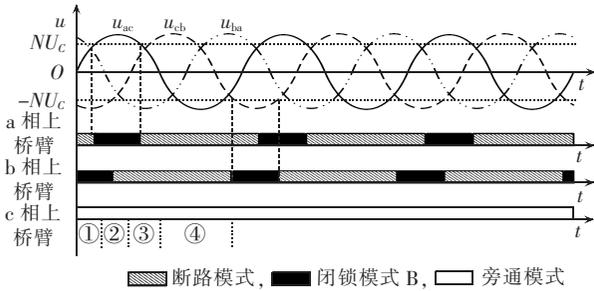
结合式(1)~(6), 可知此时换流单元可分为 2 种情景: 当 $0 < M < \sqrt{3}/3$ 时, 约束(4)~(6)恒成立, 即上述 3 个潜在回路中无充电电流; 当 $\sqrt{3}/3 < M < 1$ 时, 约束(4)、(5)恒成立而约束(6)不恒成立, 即上述潜在回路①、②不存在, 潜在回路③可能存在。在实际系统中 M 一般选取在 0.8~0.95 之间, 故上述第二情景会出现。

根据上述分析, 对于闭锁桥臂而言只可能存在 2 种运行状态, 即闭锁模式 B 和断路模式 C, 而处于闭锁模式 A 的桥臂所提供的反电势已经大于交流侧线电压峰值, 故闭锁模式 A 不会出现。当约束(10)满足时, 桥臂处于闭锁模式 B, 否则处于断路状态。通过旁通对的电流包括 2 种成分: 一种是整个系统的直流电流, 另一种是闭锁桥臂的充电电流。根据组合方式, 上桥臂存在 4 种交替出现的运行模式, 分别如图 8 所示, 类似地也可以分析下桥臂的充电情况。

$$u_{xc} > NU_c \quad x = a, b \quad (10)$$

其中, u_{xc} 为 x 相-c 相间线电压。

在投旁通对期间, 当桥臂无法提供足够的反电势使得充电回路阻断时(即约束(10)成立), 交流系统将通过旁通对桥臂和闭锁桥臂构成的通路向闭锁桥臂的电容充电, 此时待投退换流单元存在小部分充电功率。其余时间, 因为处于闭锁模式的桥臂所提供的反电势大于交流侧线电压峰值, 故此时待投退换流单元与交流系统的交换功率为零。



时段①:a相上桥臂处于断路模式,b相上桥臂处于闭锁模式 B, c相上桥臂处于旁通模式。
时段②:a,b相上桥臂均处于闭锁模式 B,c相上桥臂处于旁通模式。
时段③:a相上桥臂处于闭锁模式 B,b相上桥臂处于断路模式, c相上桥臂处于旁通模式。
时段④:a,b相上桥臂均处于断路模式,c相上桥臂处于旁通模式。

图 8 投旁通对后桥臂运行模式示意

Fig.8 Schematic diagram of arm operation mode after switching on bypass pair

为降低对电容充电程度,在单元投退时应降低换流变压器的档位,从而间接减少充电时间;同时子模块采用改进型的 CDSM,即阻尼支路上串接阻尼电阻,可有效减少充电电流。

2.3 串联类单元投退控制策略和动作时序设计

利用 2.2 节所提出的投旁通对策略,分别设计串联类基本换流单元的退出和投入流程。

单元退出运行流程如下:

- a. 向两端待退出单元发出信号,投入相应的旁通对,系统进入半压运行,直流电流由旁通对承担;
- b. 闭合相应的旁路开关,部分直流电流转移到旁路开关上来;
- c. 向两端待退出换流单元发出闭锁信号,封锁所有 IGBT 触发信号,利用二极管箝位作用,实现闭锁,直流电流全部转移到旁路开关上;
- d. 跳开换流单元交流断路器,打开两端的隔离开关,彻底隔断交直流系统间的电气连接;
- e. 利用所配置的泄放电阻,以实现模块电容能量泄放,并可进行例行的检修等计划;
- f. 单元退出控制结束。

单元投入运行流程如下:

- a. 利用文献[26]所述的交流侧预充电策略,将待投入换流单元电容充电到额定状态,闭锁换流单元;
- b. 闭合待投入换流单元的直流隔离开关;
- c. 投入旁通对,其余桥臂仍保持闭锁状态,部分直流电流从旁路开关中转移到旁通对上;
- d. 打开旁路开关,直流电流全部转移到旁通对上;
- e. 解锁剩余 2 个桥臂,切换到正常运行模式(定功率或定直流电压),系统逐步恢复到额定运行状态;
- f. 单元投入控制结束。

3 仿真分析与验证

为验证上文所提出的单元投退控制策略的有效性,在电磁暂态软件 PSCAD/EMTDC 中搭建相应的仿真模型,主要的仿真参数如表 1 所示。

表 1 算例系统的主回路参数

Table 1 Main circuit parameters of simulation system

对象	参数	有名值
直流系统	额定直流电压(单极)	250 kV
	额定功率(每个单元)	250 MW
交流系统	电压等级	500 kV
	换流变压器变比	500 kV/250 kV
	换流变压器容量	350 MV·A
	换流变压器漏抗	0.1 p.u.
	电压调制比	0.816
换流单元	每桥臂电容数	40
	子模块额定电容	8000 μ F
调制策略	额定电容电压	6.25 kV
	最近电平调制	
架空线	长度	1150 km

图 9 给出了串联类单元②退出运行的仿真结果。初始阶段,系统的输送功率为 500 MW。1.0s 控制系统向两端待退出单元发出信号,投入相应的旁通对同时闭锁剩余两相桥臂;直流电压降低,系统进入半压运行模式,系统输送的直流功率开始下降;因为系统结构发生突变,直流电流出现振荡现象,但是振荡分量衰减很快;电容电压在投旁通器件间歇性充电。20 ms 后旁路开关闭合,直流电流由旁路开关和旁通对共同承担。40 ms 后,待退出单元完全闭锁,直流电流全部转移到旁路开关上,系统输送功率维持在 250 MW,退出换流单元的电容电压保持恒定。

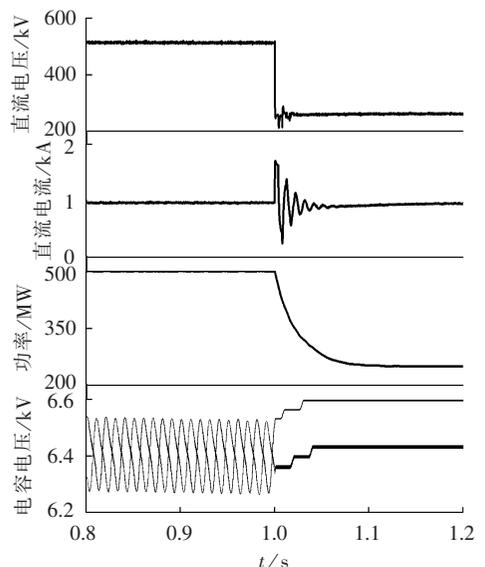


图 9 串联类单元退出运行仿真结果

Fig.9 Simulative results of series-type unit switch-off

图 10 给出了串联类单元②投入运行的仿真结果,该过程实际上是单元退出的逆过程。初始阶段,

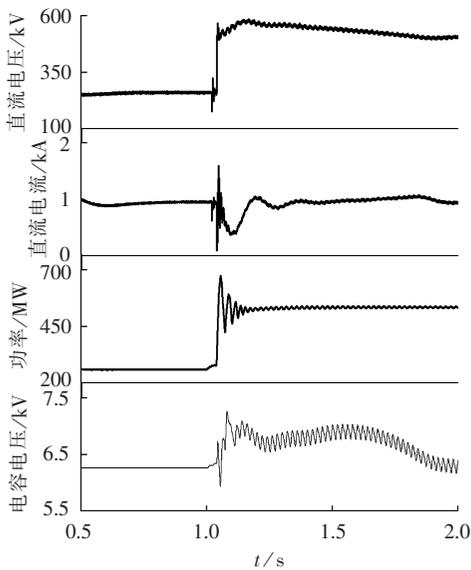
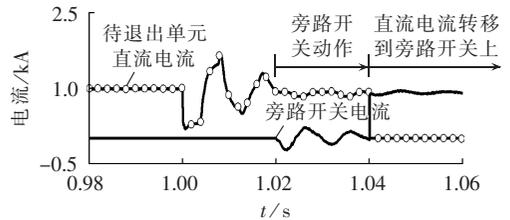


图 10 串联类单元投入运行仿真结果

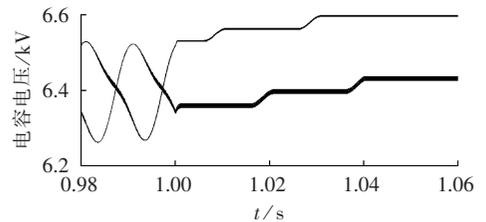
Fig.10 Simulative results of series-type unit switch-on

系统的输送功率为 250 MW;待投入单元已经预充电完成,处于闭锁状态。1.0 s 控制系统向两端待投入单元发出信号,投入相应的旁通对同时维持剩余两相桥臂的闭锁状态,此时直流电流由旁路开关和旁通对共同承担。20 ms 后旁路开关断开,直流电流全部转移到旁通对上。40 ms 后,两端待投入单元解锁,控制模式切换到正常模式(定功率和定电压控制),由于直流网络出现突变,直流电流和功率出现暂时性的振荡,1.8 s 后系统进入稳态运行。

图 11 给出了在投旁通对期间(单元退出)时,桥臂电流与旁路开关电流转移过程和电容电压充电示意。由图 11(a)和(b)可看出,投旁通对期间桥臂电流非正,意味着闭锁桥臂只能处于充电模式 B 和断路模式,从而验证了上文的分析。由图 11(a)—(c)可看出,旁通对的桥臂承担了直流电流延续的作用,维系了直流功率的输送。投旁通对的瞬间由于系统



(c) 电流



(d) 电容电压

图 11 投旁通对期间换流器充电和直流电流转移示意

Fig.11 Schematic diagram of converter charging and DC transferring during bypass pair switch-on

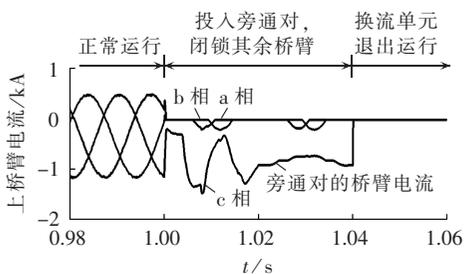
网络发生突变,直流电流出现振荡但衰减很快;旁路开关闭合后,分担了一部分直流电流成分;当旁通对闭锁后,直流电流全部转移到旁路开关上来。由图 11(d)可以知道,旁通对投入期间,闭锁桥臂轮流处于充电模式和断路模式下,充电模式时电容电压逐步升高,但是由于阻尼电阻的作用,上升幅度很小。整个单元闭锁器件,桥臂电流下降到零,模块电容因为吸收能量电压略有上升,完全闭锁后电容电压保持恒定。

4 结语

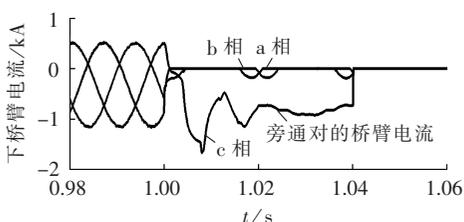
基于 C-MMC 组合式换流器的双极结构形式的柔性直流系统最大优势在于能够实现直流故障自清理同时解决目前架空线大容量问题,运行方式灵活多样,但拓扑结构和控制系统相对复杂,如何实现换流单元正常在线投退是难点。本文重点对换流单元的投退过程和特性进行了分析,并设计了一套换流单元投切策略和设备动作配合时序,以保障换流单元投退时系统能稳定运行;特别地针对串联类换流单元投退,提出了一种基于投旁通对的控制策略,实现直流电流顺利地由换流单元转移到旁路开关。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭建相应仿真模型,对所设计控制策略进行分析验证。

参考文献:

- [1] 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,2012:1-25.
 - [2] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):1-14.
- YANG Xiaofeng,LIN Zhiqin,ZHENG Qionglin,et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(6):1-14.



(a) 上桥臂电流



(b) 下桥臂电流

- [3] 蔡新红,赵成勇. 模块化多电平换流器型高压直流输电系统控制保护体系框架[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):157-163.
CAI Xinhong,ZHAO Chengyong. Framework of control and protection system for MMC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):157-163.
- [4] 何大清,蔡旭. 模块化多电平换流器的限幅控制和混合调制[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):63-66.
HE Daqing,CAI Xu. Limitation control and hybrid modulation of modularized multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):63-66.
- [5] 刘栋,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):68-73,80.
LIU Dong,TANG Guangfu,HE Zhiyuan,et al. Hybrid real-time simulation technology for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(9):68-73,80.
- [6] 韦延芳,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. New HVDC power transmission technology:MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):1-9.
- [7] 徐政,屠卿瑞,裘鹏. 从 2010 国际大电网会议看直流输电技术的发展方向[J]. 高电压技术,2010,36(12):3070-3077.
XU Zheng,TU Qingrui,QIU Peng. New trends in HVDC technology viewed through CIGRE 2010[J]. High Voltage Engineering,2010,36(12):3070-3077.
- [8] 郑超,滕松,宋新立,等. 百万千瓦柔性直流接入大连电网后的系统特性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):15-19.
ZHENG Chao,TENG Song,SONG Xinli,et al. Analysis on system characteristic after incorporation of ± 320 kV/1 000 MW VSC-HVDC into Dalian Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):15-19.
- [9] PERALTA J,SAAD H,DENNETIERE S,et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(3):1501-1508.
- [10] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
ZHAO Chengyong,CHEN Xiaofang,CAO Chungang,et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(23):82-87.
- [11] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.
WANG Shanshan,ZHOU Xiaoxin,TANG Guangfu,et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.
- [12] 徐政,唐庚,黄弘扬,等. 消解多直流馈入问题的两种新技术[J]. 南方电网技术,2013,7(1):6-14.
XU Zheng,TANG Geng,HUANG Hongyang,et al. Two new technology for eliminating the problems with multiple HVDC infeeds[J]. Southern Power System Technology,2013,7(1):6-14.
- [13] TRAINER D R,DAVIDSON C C,OATES C D M,et al. A new hybrid voltage-sourced converter for HVDC power transmission [C]//CIGRE Session. Paris,France:CIGRE,2010:1-12.
- [14] 薛英林,徐政,屠卿瑞,等. 桥臂交替导通多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):60-64.
XUE Yinglin,XU Zheng,TU Qingrui,et al. Capacitor voltage balancing control for alternate-arm multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):60-64.
- [15] MERLIN M M C,GREEN T C,MITCHESON P D,et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London,UK:[s.n.],2010:1-5.
- [16] XUE Y L,XU Z,TU Q R. Modulation and control for a new hybrid cascaded multilevel converter with DC blocking capability [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(4):2227-2237.
- [17] 赵成勇,许建中,李探. 全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(1):106-114.
ZHAO Chengyong,XU Jianzhong,LI Tan. DC faults ride-through capability analysis of full-bridge MMC-MTDC system[J]. Sci China Tech Sci,2013,43(1):106-114.
- [18] MARQUARDT R. Modular multilevel converter:an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications[C]//2010 International Power Electronics Conference(IPEC). Sapporo, Japan;IEEE,2010:502-507.
- [19] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with dc-short circuit current limitation[C]//2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). Jeju,Korea:IEEE,2011:1425-1431.
- [20] 薛英林,徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.
XUE Yinglin,XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of the C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(21):63-70.
- [21] 薛英林,徐政,张哲任,等. 采用不同子模块的 MMC-HVDC 阀损耗通用计算方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):20-29.
XUE Yinglin,XU Zheng,ZHANG Zheren,et al. General method of valve loss calculation for MMC-HVDC with different submodules[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):20-29.
- [22] 薛英林,徐政,张哲任,等. 子模块故障下 C-MMC 型高压直流系统的保护设计和容错控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):89-97.
XUE Yinglin,XU Zheng,ZHANG Zheren,et al. Protection design and fault-tolerant control of C-MMC based HVDC system under sub-module failure condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):89-97.
- [23] 马玉龙,陶瑜,周静,等. 基于实时数字仿真器的特高压直流换流单元投退特性分析[J]. 电网技术,2007,31(21):5-10.
MA Yulong,TAO Yu,ZHOU Jing,et al. Analysis on deblocking and blocking characteristics of UHVDC commutation units based on real-time simulator[J]. Power System Technology,2007,31(21):5-10.
- [24] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-37.

ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-37.

[25] 王姗姗,周孝信,汤广福,等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):1-7.

WANG Shanshan,ZHOU Xiaoxin,TANG Guangfu,et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):1-7.

[26] 薛英林,徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(11):1-7.

XUE Yinglin,XU Zheng. Start control for the MMC-HVDC system based on clamp double submodule[J]. Power System Protection and Control,2013,41(11):1-7.

作者简介:



薛英林(1986—),男,河北藁城人,博士,主要研究方向为直流输电与柔性直流输电(E-mail:ylinglinxue@gmail.com)。

Converter unit on/off control based on bypass pairs for combined C-MMC system

XUE Yinglin¹,ZHAO Zheng¹,GE Fenglei²,ZHANG Zheren³

(1. State Power Economic Research Institute,Beijing 102209,China;

2. State Grid Xuzhou Power Supply Company,Xuzhou 220005,China;

3. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027,China)

Abstract: The combined C-MMC (Modular Multilevel Converter applying Clamp double submodule) with converter units connected in series and parallel is adopted to achieve the high-voltage and large-capacity power transmission. Two basic patterns, series-type and parallel-type, are classified for the switch-on/off process of converter unit in the practical project and the technical difficulties of each type are analyzed. The configuration scheme of bypass/disconnecting switches and the current limiting scheme of series resistors in clamp double submodule are designed. A strategy based on the bypass pair control is proposed for the series-type unit switch-on/off, which takes the arms of one phase as the bypass pair while blocks the arms of other phases during the unit switch-on/off to smoothly transfer the direct current between the converter unit and the bypass switch. For the blocked arms, the resistor connected to the clamping diode in series effectively suppresses the charging current and damps the increase of module capacitor voltage. The effectiveness and feasibility of the proposed strategy are verified by the results of PSCAD/EMTDC simulation.

Key words: modular multilevel converter; clamp double submodule; arm blocking; damping resistor; control