

## 基于模块化多电平变换器的储能系统综述

李善颖<sup>1</sup>, 吴涛<sup>1</sup>, 任彬<sup>2</sup>, 徐永海<sup>2</sup>, 袁敞<sup>2</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;  
2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 储能系统是当前和未来新能源电力系统中的关键组成部分, 储能系统的引入促进了电网结构的优化, 实现了新能源的友好接入和协调控制。模块化多电平换流器(Modular multilevel converter, MMC)作为多电平换流器家族中的一员, 在中高压大功率场合有着广泛的应用。对基于模块化多电平变换器的储能系统的研究情况进行归纳和总结。首先简要介绍了 MMC 的拓扑结构和技术特点, 其次对各种储能技术的概况进行总结。然后着重讨论了储能单元接入 MMC 的方式和带有储能装置的 MMC 的调制策略、子模块电容电压均衡、主电路参数设计、控制方面等关键技术的研究进展情况。最后对基于模块化多电平变换器的储能系统研究的重点问题提出了建议。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 储能系统; 接入方式; 脉冲调制; 电压控制; 控制策略

### Review of energy storage system based on modular multilevel converter

LI Shanying<sup>1</sup>, WU Tao<sup>1</sup>, REN Bin<sup>2</sup>, XU Yonghai<sup>2</sup>, YUAN Chang<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China; 2. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** Energy storage (ES) system is a key component in new energy power system at present and in the future, application of energy storage system will promote the optimization of the grid structure and achieve friendly access and coordination control of new energy. The modular multilevel converter (MMC) is a member of multilevel converter family, and has been widely applied in the medium- or high-voltage high power applications. Progress of energy storage system based on MMC is concluded. Firstly, the operation principles and the technical characteristics of MMC are introduced briefly; secondly, the development of different energy storage technology is introduced. Then the energy storage integrating methods and the key technologies of MMC-ES such as modulation strategy, sub-model capacitor voltage balancing, main circuit parameter design and control strategy are summarized and analyzed. Finally, suggestions for key issues of MMC-ES are proposed.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2011AA05A113).

**Key words:** modular multilevel converter (MMC); energy storage system; integrating methods; pulse modulation; voltage control; control strategy

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0139-08

## 0 引言

在新能源电力系统中采用储能技术能够有效地实现可再生能源的友好接入和协调控制<sup>[1-3]</sup>, 储能技术主要研究利用储能系统(Energy storage system, ESS)将电能转换为化学能、势能、电磁能等形态进

行存储, 并在需要时重新转换为电能予以释放。ESS 主要包括储能单元和功率转换系统(Power conversion system, PCS)两大组成部分, 对 PCS 采用合理的控制策略可以实现对储能单元的充放电管理、网侧负荷功率的跟踪、网侧电压控制等。

近年来电力电子技术的快速发展使得 PCS 的拓扑具有多样化, 其中多电平换流器以其独特的结构特点在中高压大功率场合受到广泛关注<sup>[4]</sup>。多电

平换流器中级联 H 桥换流器(Cascaded H-Bridge Converter, CHC)作为 PCS 在储能系统中的应用已有较多研究<sup>[5-7]</sup>; 同为多电平换流器中近年来广受关注的另一拓扑——模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的拓扑结构<sup>[8]</sup>在高压直流输电领域得到广泛研究与应用<sup>[9-10]</sup>, MMC 具有模块化程度高, 谐波畸变小, 开关损耗低, 适合高压大功率场合的应用的特点<sup>[11]</sup>。

2011年国外学者Remus Teodorescu及其合作者进行了 MMC 与储能相结合的研究<sup>[12]</sup>(Modular Multilevel Converter-Energy Storage, MMC-ES), 指出其具有诸多的优势: 不采用变压器直接接入中高压电网, 提高效率节省投资; 模块化的结构可以使储能单元分散接入, 使储能单元运行在较低电压, 还能够提高效率和可靠性; 可作为交直流电网互联的中间环节, 能够储存交直流电网的能量或释放能量等。自此, 有关 MMC-ES 的研究引起了国外相关研究者的关注, 相关研究包括 MMC-ES 应用于电动汽车充电站作为能量缓冲器, 应用于牵引系统中等, 研究的热点包括 MMC-ES 的功率控制与电压控制以及实验研究等, 有望在不久之后得到实际应用, 但截至目前 MMC-ES 在国内的研究则较少<sup>[13]</sup>。

本文首先简要地介绍了 MMC 拓扑结构和技术特点, 其次介绍储能技术的概况, 然后着重分析储能单元接入 MMC 的方式, 对 MMC-ES 系统的研究现状进行归纳和分析, 最后对 MMC-ES 未来应开展的研究工作提出了展望和建议。

## 1 MMC 的拓扑结构和技术特点

### 1.1 MMC 的拓扑结构

三相 MMC 的拓扑结构如图 1 所示, O 点表示零电位参考点。一个换流器有 6 个桥臂, 每个桥臂由一个电抗器  $L_0$  和  $N$  个子模块(SM)串联而成, 上下两个桥臂构成一个相单元, 两个桥臂电抗器的连接点构成对应相的交流输出端。单个 SM 结构如图中所示,  $T_1$  和  $T_2$  代表 IGBT,  $D_1$  和  $D_2$  代表反并联二极管,  $C_0$  代表子模块的直流侧电容器;  $U_C$  为电容器的电压,  $u_{SM}$  为子模块两端的电压。

### 1.2 MMC 的技术特点

相比于传统的 2 电平或 3 电平的拓扑, MMC 具有许多的技术特征<sup>[14]</sup>。

(1) 高度模块化的结构。子模块的主电路和控制系统均采用模块化设计, 通过调整子模块的个数即可满足不同电压和功率等级的需求, 便于系统扩容, 有利于工程设计和集成化生产。子模块采用相同容

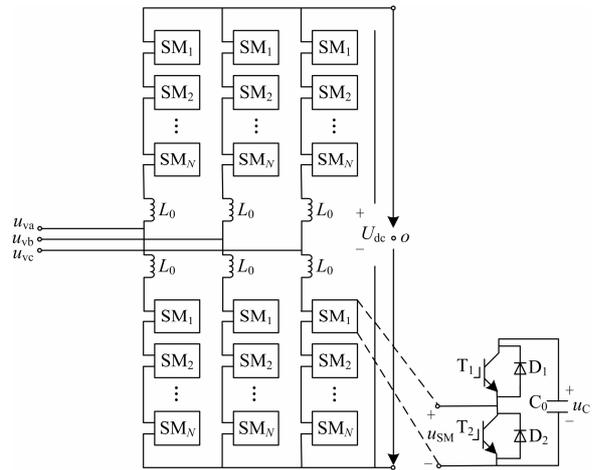


图 1 MMC 拓扑结构及子模块拓扑示意图

Fig. 1 Configuration of MMC and its sub-module

量的直流电容和功率开关器件, 具有很强的替代性, 便于系统维护。

(2) 优良的输出特性。通过调整子模块的串联个数可以扩展到更多的电平输出, 减小了电磁干扰和输出电压谐波含量, 输出电压非常平滑且接近理想正弦波, 在网侧可以不安装交流滤波器, 节省投资, 有利于电网设备的运行维护。与传统的两电平 VSC 不连续的“斩波”波形不同, MMC 的桥臂电流是连续的, 且脉动频率较高, 能显著降低对交流输出滤波电感的要求。

(3) 具有公共直流母线。MMC 无需集中电容器组或其他无源滤波元件进行直流侧滤波, 可避免直流侧短路引起的浪涌电流及系统机械破坏的风险, 提高系统可靠性的同时, 也有利于降低系统成本。MMC 可实现对公共直流母线电压的有源控制, 公共直流母线电压和电流连续可调。同时, 公共直流母线的存在使得 MMC 可以工作在背靠背系统中, 典型应用如 HVDC、电能质量问题治理等场合。

(4) 不平衡运行能力。由于 MMC 每一相桥臂的工作原理完全相同, 均可独立控制, 当 MMC 交流侧发生不平衡故障(如单相故障)时, 其他两相仍可继续满功率传输能量, 系统传输容量仅需降低三分之一。

(5) 开关器件方面的优势。MMC 的模块化结构使得其对 IGBT 的同一性要求不高, 且容易封装, 扩展方便, 避免了传统两电平、三电平直接串联 IGBT 所带来的静态、动态均压问题。MMC 的开关器件的开关频率低, 系统开关损耗小, 提高了经济性。

(6) 故障穿越和恢复能力。由于 MMC 的直流储能能量大, 网侧发生故障时, 功率单元不会放电, 公

共直流母线电压仍然连续, 不仅保障了MMC的稳定运行, 并可在较短的时间内从故障状态恢复, 因而具有很强的故障穿越和恢复能力。

## 2 储能技术及其接入方式研究概况

### 2.1 储能技术概况

现有的储能技术主要包括物理储能、电磁储能、化学储能和相变储能等四类<sup>[15]</sup>。其中物理储能主要包括抽水蓄能、飞轮储能和压缩空气储能; 电磁储能包括超级电容储能和超导磁储能等; 化学储能包括铅酸电池、锂离子电池、钠硫电池和液流电

池等; 相变储能包括熔融盐储能和相变建筑材料储能等。与其他储能方式相比, 相变储能并非以电能的形式释放存储的电能, 且其功率/能量等级涉及的因素很复杂, 但随着智能电网的发展, 其将在需求侧管理(DSM)方面发挥重要作用<sup>[16]</sup>。

各种储能技术在其能量密度、功率密度、响应速度和储能系统容量规模等方面均具有不同的表现, 而同时电力系统也对储能系统的各种应用提出了不同的技术要求。因此, 必须兼顾各方面需求, 选择合适的储能方式应用于电力系统<sup>[17]</sup>。表1对各种典型储能技术的典型额定功率、持续时间、主要特点、应用方向及国内外应用现状进行了总结。

表1 不同储能技术的比较和研究应用现状

Table 1 Comparison and development progress of different energy storage types

储能类型	典型额定功率	持续时间	主要优点	主要缺点	应用方向	国内外研究应用现状
抽水蓄能	100~2000 MW	4~10 h	大功率、大容量、低成本	受地理条件限制	辅助削峰填谷、黑启动和备用电源	国内已建 22 座, 最大 2 400 MW
飞轮储能	5 kW~10 MW	1 s~30 min	高功率密度、长寿命	低能量密度	提高电力系统稳定性、电能质量调节等	美国已建 20 MW, 国内实验室研究阶段
压缩空气储能	10~300 MW	1~20 h	大功率、大容量、低成本	受地理条件限制	备用电源、黑启动等	国外已建最大 100 MW, 国内研究较少尚没有应用
超级电容器	10 kW~1 MW	1~30 s	高能量转换效率、长寿命、高功率密度	低能量密度	短时电能质量调节、平滑可再生能源功率输出	小规模应用示范
超导储能	10 kW~50 MW	2 s~5 min	响应速度快	低能量密度、高制造成本	电能质量调节、提高电力系统稳定性和可靠性等	美国已投产最大 1.8 GJ, 国内有 35 kJ 低温超导样机
铅酸电池	100 kW~100 MW	数小时	低成本	深度充放电时寿命较短	平滑可再生能源功率输出、黑启动	技术成熟, 国内示范工程最大 40 MW
锂电池	100 kW~100 MW	数小时	大容量、高能量密度、高功率密度、高能量转换效率	安全性、生产成本低	平滑可再生能源功率输出、辅助削峰填谷、电能质量调节等	技术成熟, 国内外均有兆瓦级示范工程
钠硫电池	100 kW~100 MW	数小时	大容量、高能量密度、高能量转换效率	安全性问题	平滑可再生能源功率输出、辅助削峰填谷	国内掌握大容量单体技术, 有示范工程
液流电池	5 kW~100 MW	1~20 h	大容量、长寿命	低能量密度	辅助削峰填谷、平滑可再生能源功率输出	国内拟建 5 MW 风储示范工程

### 2.2 储能接入 MMC 方式的研究

储能单元接入 MMC 直流侧的方式与储能种类的选择有关, 同时需考虑控制策略的复杂性、功率传输效率、运行可靠性、整体经济性等诸多因素。现有研究对储能单元并联接入 MMC 直流侧的方式大体分为: 直接并联、经过直接 DC/DC 并联、经过隔离式 DC/DC 并联。

#### 2.2.1 储能单元直接并联在直流侧

储能单元直接并联在直流侧的优点是结构简单, 直流侧无变压环节, 能耗相对较低。主要缺点

是储能系统的容量选择缺乏灵活性, 对储能单元的寿命有影响等。储能单元直接并联在直流侧的拓扑结构如图 2 所示。

文献[13]采用超级电容器作为储能单元, 直接将子模块电容器替换为超级电容器。文献[18-19]分析了单体的大蓄电池直接并联在 MMC 的公共直流母线上的性能, 仿真结果显示此种拓扑结构性能相对于蓄电池分散接入子模块较差。文献[20]在电动汽车充电站中采用了电池储能单元作为能量缓冲器, 电池直接并联在子模块直流侧。文献[21]采用

了 MMC 带蓄电池储能装置作为电动汽车的牵引驱动系统, 认为加入 DC/DC 环节会降低整个装置的效率, 直接将子模块电容替换为蓄电池。文献[22]也是将 MMC 子模块电容替换为蓄电池, 但整体装置是应用于电动车固定充电的。文献[23]针对二次低频振荡电流对电池的影响, 提出了在电池和子模块之间加入调谐二次谐波的滤波器和低通滤波器来消除振荡电流, 以延长电池寿命。

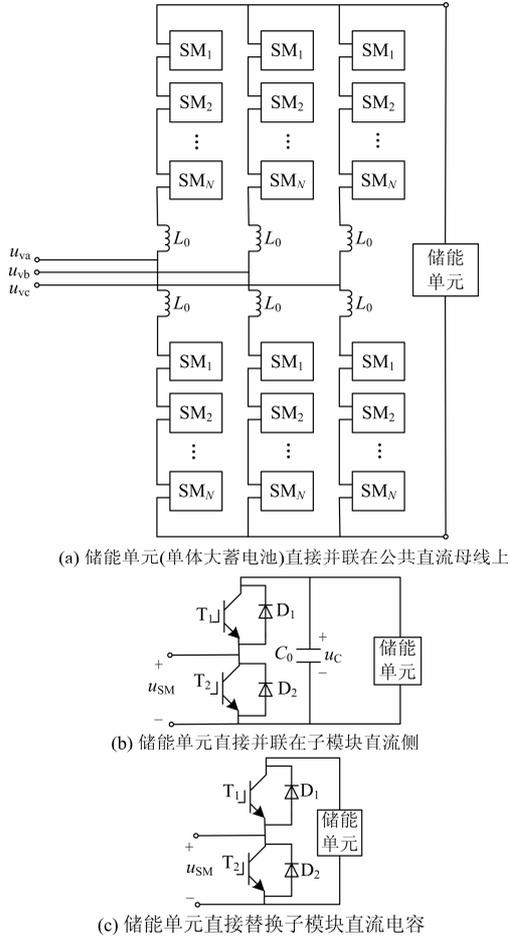


图 2 储能单元直接并联在直流侧的拓扑结构图

Fig. 2 Topology of energy storage unit paralleled on the DC side directly

### 2.2.2 储能单元经 DC/DC 并联在直流侧

文献[19]采用蓄电池作为储能单元, 指出经 DC/DC 环节并联具有诸多优势, 可以把电池与子模块电容解耦, 减少了电池的直流滤波需求, 增加电池寿命, 可允许子模块电容电压适度降低。引入 DC/DC 环节的主要缺点是会使整个系统的能量转换效率有所降低。储能单元经直接 DC/DC 并联在直流侧的拓扑如图 3 所示。

文献[24]指出超级电容器充放电迅速, 更适于作为间歇性的功率缓存而不是作为一个持续的电

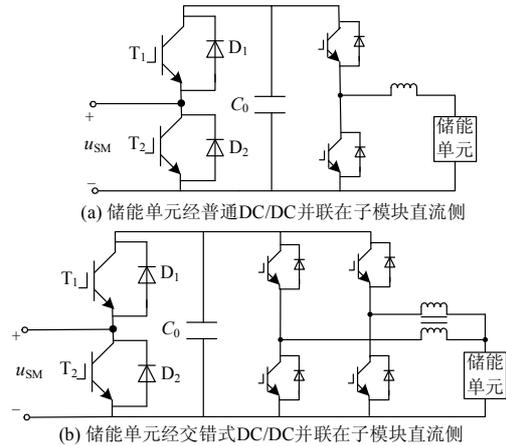


图 3 储能单元经直接 DC/DC 并联在直流侧的拓扑图

Fig. 3 Topology of energy storage unit paralleled on the DC side through non-isolated DC/DC

源, 在功率牵引变换器中选择超级电容器作为储能单元, 需要用 DC/DC 变换器提高储能单元的电压, 储能单元还可以控制直流侧子模块电容电压的平衡。文献[25]考虑到避免子模块的低频分量流入电池, 采用非隔离的 DC/DC 环节将蓄电池并联接在子模块的直流侧, 并提到储能单元为子模块电容电压平衡控制提供了额外的自由度, 在电池侧通过 DC/DC 接口控制子模块电容电压均衡。文献[12]提出了一种交错式的双向升压变换器, 能够降低电感纹波进而减少电感尺寸, 综合考虑到控制策略复杂性和开关器件个数采用了普通双向升压变换器。文献[26]指出不能用振荡的电流对电池进行充电, 因而加入了能够双向功率流动的 DC/DC 环节。

### 2.2.3 储能单元经隔离式 DC/DC 并联在直流侧

文献[22]给出了一种隔离式 DC/DC 环节, 其主要优点是能够以相对较低的储能单元的电压输出较高的交流电压, 减少开关损耗, 有电气隔离; 但缺点是使用了较多的开关器件和控制策略较复杂。文献[27-29]介绍了 MMC 在光伏电池并网方面的应用, 提出了在光伏电池需要接地的时候需通过隔离式的 DC/DC 环节并联在子模块直流侧。储能单元经隔离式 DC/DC 环节并联在直流侧的拓扑如图 4 所示。

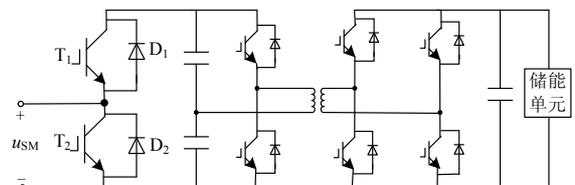


图 4 储能单元经隔离 DC/DC 并联在子模块直流侧

Fig. 4 Energy storage unit paralleled on the DC side through isolated DC/DC

综上所述, 对于不同的储能单元以及不同的应用场合应考虑不同的接入方式。采用蓄电池储能单元时, 为防止子模块低频分量流入电池, 延长电池寿命, 电池通常经 DC/DC 环节并联在子模块直流侧, 但对于效率要求较高的场合可用蓄电池替换子模块直流电容或者并联在子模块直流侧。采用超级电容器储能时, 考虑其放电特性, 需 DC/DC 环节来提高其端电压, 也可将子模块直流电容直接替换为超级电容。当储能单元有特殊的运行要求如接地时, 需经过隔离式 DC/DC 环节并联在直流侧。

### 3 MMC-ES 的关键技术研究现状

国内外对 MMC 在脉冲调制、直流电压控制、预充电、环流、谐波、数学模型、主电路参数设计、故障保护等关键问题都进行了一定的研究。MMC-ES 作为 MMC 与储能装置的结合在关键技术方面与 MMC 有很多相同之处, 但在调制技术、子模块电容电压均衡、主电路参数设计、控制方面等有特殊之处。由于 MMC-ES 尚属新兴研究, 现有文献对其研究主要包括但不限于电压控制、功率平衡控制、储能单元的控制等方面。本节重点讨论 MMC-ES 的脉冲调制、子模块电容电压平衡控制、主电路参数设计、控制方面的研究等关键技术问题。

#### 3.1 MMC-ES 的脉冲调制技术

若储能单元采用直接并联的方式接入 MMC, 则 MMC-ES 的调制策略与 MMC 相同。若储能单元采用直接 DC/DC 接入或隔离式 DC/DC 接入则脉冲调制分为对子模块的调制和 DC/DC 环节的调制。

文献[12]介绍了三种脉冲调制技术, 空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)、电平转换脉宽调制(Level Shift Pulse Width Modulation, LS-PWM)、载波移相脉宽调制(Carrier Phase-shifted Pulse Width Modulation, CPS-SPWM), 对 CPS-PWM 进行改进, 对于每个桥臂由  $n$  个子模块构成的 MMC-ES 上下桥臂各采用  $n/2$  条载波与调制波进行对比产生占空比信号, 能够在基频下简化电容电压平衡, 但是减少了输出电平数。文献[25]采用了两个调制器, 对于子模块的调制采用 CPS-PWM, 对于 DC/DC 环节由电池侧控制子模块电容电压平衡的控制器得到调制信号进行调制。

#### 3.2 MMC-ES 的子模块电容电压均衡控制技术研究

目前直流电容电压平衡控制有两种基本思路: 一种通过外部的平衡控制电路来实现<sup>[30]</sup>, 另一种则通过自身的平衡控制算法来实现<sup>[31]</sup>。通过外部平衡控制电路的方法其控制算法的设计比较简单, 但由

于需要额外的硬件电路和控制系统, 增加了系统的成本和复杂性, 降低了系统的可靠性。相比之下, 利用自身的平衡控制算法实现子模块电容电压平衡则不存在上述问题, 控制的难点在于对系统中总的有功能量和无功能量的控制, 以及如何均衡同一相桥臂中不同子模块的电容电压。

由于子模块直流侧并联了储能单元, MMC-ES 的子模块电容电压平衡与 MMC 不完全相同。文献[24]的储能单元采用超级电容器储能, 指出可利用储能单元来保持子模块电容电压均衡, 但未给出具体实施方法。文献[25]利用直流侧的蓄电池通过 DC/DC 环节控制子模块的电压平衡, 设计电流内环电压外环控制器对子模块电容电压进行平衡控制。文献[27]分析了 MMC 在光伏电池并网方面的应用, 由于光伏电池采用最大功率点追踪控制, 因而每个子模块运行在不同的电压下, 不再采用原来的子模块平衡策略, 而是保证每个子模块的电压保持在其参考值附近。

综上所述, MMC-ES 由于直流侧并联了储能单元, 为子模块电容电压平衡控制提供了额外的自由度, 简化了子模块电容电压平衡的控制算法。

#### 3.3 MMC-ES 的主电路参数设计

主电路参数影响着 MMC 系统的动态和稳态性能, 其中关键主电路参数主要有桥臂电抗器和子模块电容参数的设计和选取。桥臂电感参数选择不当将直接制约 MMC 输出功率, 影响 MMC 输出电流的稳态、动态响应特性以及系统故障管理能力。子模块电容器参数的大小直接决定了电容电压的波动范围, 同时也会影响到输出交流电压的波形质量。

现有文献中对带有储能装置的 MMC 主电路参数设计的研究不多, 文献[32]介绍了应用于带储能装置的 MMC 拓扑的参数设计, 首先解耦控制变量, 推导计算出桥臂电压, 从能量的角度计算了子模块电容参数, 指出桥臂电抗器的取值不取决于输出电流的纹波而是取决于在电网侧发生故障时电压预控制的反应时间, 得出对于应用于储能的 MMC 系统的设计最关键的是开关器件的选择的结论。

#### 3.4 MMC-ES 控制方面研究

MMC-ES 的控制包括对 MMC 的控制和对储能单元的控制以及对 MMC-ES 系统的整体控制。对 MMC-ES 系统的整体控制包括功率控制、电压控制等, 对储能单元的控制研究主要集中在对蓄电池储能单元的电池荷电状态平衡的控制。

文献[25]将电池荷电状态平衡建模为具有积分问题的一阶系统, 推导出闭环控制器的显式传递函数, 分析了控制器增益选择的限制。另外, 对于电

网侧发生故障导致电压不平衡的工况下容易造成电池荷电状态不平衡的情况,采用注入共模电压的方法来保证网侧不平衡不影响每一相上下桥臂的功率分配。文献[26]为保持有功功率的平衡控制,向每个电池子模块注入平衡电流,给出了平衡电流的计算方法,仿真讨论了在电池电压平衡和不平衡的情况下系统的运行,得出电池电压不平衡的情况下会造成子模块电容电压的不平衡的结论,但是文中没有给出解决方法。此外,文中给出了一种在电池空闲状态下通过注入无功电流来对子模块电容电压进行平衡的方法。

因此,对 MMC-ES 的控制要兼顾对 MMC 和储能单元的控制,将总体控制分为各个子控制,协调各控制环节以达到运行要求。

#### 4 MMC-ES 的研究展望和建议

综合上述分析可知,目前在理论分析、调制策略和电压控制等方面已对 MMC-ES 进行了一定的研究,但相关研究还需要进一步完善和发展,主要包括以下方面:

(1) 结合电网中的实际应用场合和 MMC 拓扑对储能单元进行选择,单一储能难以满足电力系统中的各种应用,对储能单元多样性选择的研究有待进行。

(2) 对于储能单元接入 MMC 的方式的研究更加高效以及适用于储能元件的接入方式,具有理论意义和工程实用价值。

(3) 现有对 MMC-ES 的研究多集中在交流系统平衡的工况下,但当交流侧发生故障导致不平衡工况时,会造成蓄电池储能单元的荷电状态不平衡,在不平衡工况下对基于 MMC 的储能系统运行和控制的研究有待深入。

(4) 对 MMC-ES 控制方面的研究,现有的研究侧重于采用矢量控制实现功率解耦控制,但在此基础上挖掘其无功控制能力方面的研究则较少,如研究其在电网故障情况下,通过暂时牺牲其有功控制增大无功输出,实现对系统电压的紧急支撑。拓展其无功能力控制的研究有待进行。

(5) 现有文献中对 MMC-ES 的主电路参数的研究涉及不多,但主电路参数影响着系统的动态和稳态性能,因而对主电路参数设计的研究需要进一步开展。

(6) 拓展带储能装置的 MMC 的应用,应用于新能源并网、电能质量调节、调频调峰促进电力系统稳定运行、提高电网可靠性等方面。

(7) 现有对 MMC-ES 研究多为理论研究和实验

室样机研究,需在对 MMC-ES 的实验室深入研究的基础上,开展对其在工程应用中的实践研究。

#### 5 结语

本文在对 MMC 拓扑结构和技术特点以及储能技术概况简要分析的基础上,通过对储能单元接入 MMC 的方式和 MMC-ES 关键技术的研究进展进行总结和归纳,对 MMC-ES 系统下一步研究中储能单元选择、储能接入方式、运行工况、无功控制能力、拓展应用等方面进行了展望,将为更好地研究和应用基于模块化多电平变换器的储能系统提供一定的借鉴。

#### 参考文献

- [1] 于芑,赵瑜,周玮,等.基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(24):35-40.  
YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [2] 邱培春,葛宝明,毕大强.基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平抑控制研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(3):29-33.  
QIU Peichun, GE Baoming, BI Daqiang. Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33.
- [3] 陈刚,袁越,傅质馨.储能电池平抑光伏发电波动的应用[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(2):27-31,49.  
CHEN Gang, YUAN Yue, FU Zhixin. Application of storage battery to restrain the photovoltaic power fluctuation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(2): 27-31, 49.
- [4] ABU-RUB H, HOLTZ J, RODRIGUEZ J. Medium-voltage multilevel converters-state of the art, challenges, and requirements in industrial applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2581-2596.
- [5] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H. A transformerless energy storage system based on a cascade multilevel PWM converter with star configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1621-1630.

- [6] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H, et al. A transformerless battery energy storage system based on a multilevel cascade PWM converter[C] // Power Electronics Specialists Conference (PESC), 2008: 4798-4804.
- [7] MAHARJAN L, INOUE S, AKAGI H, et al. State-of-charge (SOC)-balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(6): 1628-1636.
- [8] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna Italy, 2003: 6.
- [9] 高强, 林焯, 黄立超, 等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 33-38.  
GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.
- [10] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.  
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.
- [11] FRANQUELO L G, RODRIGUEZ J, LEON J I, et al. The age of multilevel converters arrives[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2008, 2(2): 28-39.
- [12] TRINTIS I, MUNK-NIELSEN S, TEODORESCU R. A new modular multilevel converter with integrated energy storage[C] // IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011, 7(10): 1075-1080.
- [13] 张振华, 冯涛. 模块化多电平储能单元改善并网风电场稳定性研究[J]. 四川电力技术, 2012, 35(1): 6-8, 53.  
ZHANG Zhenhua, FENG Tao. Study of used modular multilevel storage units to improve the stability of wind farms integrated to grid[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2012, 35(1): 6-8, 53.
- [14] 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): 1-15.  
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG T Q, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-15.
- [15] 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.
- [16] 刘世林, 文劲宇, 孙海顺, 等. 风电并网中的储能技术研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 145-153.  
LIU Shilin, WEN Jinyu, SUN Haishun, et al. Progress on applications of energy storage technology in wind power integrated to the grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 145-153.
- [17] 李建林. 智能电网中的风光储关键技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [18] BARUSCHKA L, MERTENS A. Comparison of cascaded H-bridge and modular multilevel converters for BESS application[C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011: 909-916.
- [19] SOONG T, LEHN P W. Evaluation of emerging modular multilevel converters for BESS applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2086-2094.
- [20] CICCARELLI F, DEL PIZZO A, IANNUZZI D. An ultra-fast charging architecture based on modular multilevel converters integrated with energy storage buffers[C] // Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013 8th International Conference and Exhibition on, 2013: 1-6.
- [21] D'ARCO S, PIEGARI L, TRICOLI P. A modular converter with embedded battery cell balancing for electric vehicles[C] // Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012: 1-6.
- [22] D'ARCO S, PIEGARI L, QURAAN M S, et al. Battery charging for electric vehicles with modular multilevel traction drives[C] // Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on, 2014: 1-6.
- [23] VASILADIOTIS M, RUFER A, BEGUIN A. Modular converter architecture for medium voltage ultra fast EV charging stations: global system considerations[C] // Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, 2012: 1-7.
- [24] COPPOLA M, DEL PIZZO A, IANNUZZI D. A power

- traction converter based on modular multilevel architecture integrated with energy storage devices[C] // Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012: 1-7.
- [25] VASILADIOTIS M, RUFER A. Analysis and control of modular multilevel converters with integrated battery energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 163-175.
- [26] SCHROEDER M, HENNINGER S, JAEGER J, et al. Integration of batteries into a modular multilevel converter[C] // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, 2013, 12(1): 2-6.
- [27] PEREZ M A, ARANCIBIA D, KOURO S, et al. Modular multilevel converter with integrated storage for solar photovoltaic applications[C] // Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, 2013, 10(13): 6993-6998.
- [28] RIVERA S, WU Bin, LIZANA R, et al. Modular multilevel converter for large-scale multistring photovoltaic energy conversion system[C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013: 1941-1946.
- [29] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
- YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [30] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 7-12.
- LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. DC capacitor voltage balancing control for cascade multilevel STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 7-12.
- [31] AKAGI H, INOUE S, YOSHII T. Control and performance of a transformerless cascade PWM STATCOM with star configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(4): 1041-1049.
- [32] HILLERS A, BIELA J. Optimal design of the modular multilevel converter for an energy storage system based on split batteries[C] // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, 2013: 1-11.

---

收稿日期: 2014-11-13; 修回日期: 2015-01-26

**作者简介:**

李善颖(1975-), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真分析及新能源并网技术; E-mail: lee22yanjin@126.com

吴涛(1968-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划及稳定分析、网厂协调、风电并网运行及控制; E-mail: mrwutao0619@sina.com

任彬(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。E-mail: rbhkz@126.com

(编辑 姜新丽)