

可用于有功功率补偿的新型静态同步补偿装置 (STATCOM)

周金辉、马文皓

国网浙江省电力有限公司电力科学研究院 浙江省杭州市拱墅区朝晖八区华电弄 1 号
邮编: 310000

A DELTA-CONNECTED STATCOM WITH MBSM AND ENERGY STORAGE

Jinhui Zhou & Wenhao Ma

Institute: Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,
Ltd, City: Hangzhou.

摘要: 在本篇论文中, 一种新型静止同步补偿装置 (STATCOMs) 被提出, 它将多母线子模块 (MBSM) 与部分能量系统相结合。新型 STATCOM 由 MBSM 拓扑和部分储能元件组成, 并以三角形与电网并联。根据移相载波调制, 如果需求电压不满足最大额定电压, 则每相中的一部分子模块旁通, 其余并联的多母线子模块能够将能量传递给电流负载, 实现传导损耗的降低。同时, 具有部分电池储能 (BEES) 的 MBSM 具有支持动态有功功率和缓解潮流传输灵活性问题的能力[6]。在 STATCOM 中注入不同类型的循环电流具有不同程度的储能能力。仿真结果表明, 注入一个大于储能三倍的循环电流可以有效地促进各相 MBSMs 之间的电压平衡。与传统 STATCOM 相比, 新 STATCOM 能够为电网提供比无功功率更多的短期有功功率支持[2]。

关键词: STATCOM、MBSM、增量、补偿、无功功率、有功功率、控制、储能。

ABSTRACT: In this paper, a novel STATCOMs is proposed which combine the multi-busbar sub-modules and partially energy storage system. The new pattern STATCOM is composed of MBSM topology with partially energy storage components and connect parallelly to the grid in delta. According the phase-shift carrier modulation, a portion of sub-modules in each phase are by-passed if the demand voltage does not meet the maximum rating voltage, the rest multi-busbar sub modules which topology are in parallel enable to deliver the energy to the current load to realize the conduction loss reducing. Meanwhile, MBSM with partially battery energy storage (BEES) have the ability to support dynamic active power and mitigate the flexibility problem in power flow transmission [6]. Injecting different type of circulating current in the STATCOM have varying degrees ability with diverse value of energy storage. Result of simulation indicate that injecting a circulating current greater than three times the energy storage can effectively promote the voltage balance between the MBSMs in each phase. Comparing with the traditional STATCOM, the new one is able to offer more than reactive power but short-term active support to grid [2].

KEY WORD: STATCOM, MBSM, Delta, compensation, Reactive power, Active power, Control, Energy storage.

1 第一章多母线子模块 (MBSM) STATCOM 的研制

1.1 全桥多母线子模块(FB-MBSM)的基本原理

全桥电路有四个 IGBT 和两个端子。端子通常用于串联相邻全桥子模块 (FBMBSM)。开关的主要状态为充电、放电和旁路。全桥多母线子模块

(MBSM) 将开关数量从四个 IGBT 增加到八个 [3]。这些终端加起来也有四个。由于 FB-MBSM 是两个全桥电路的一种特殊连接形式。同样, 电容器通过四个半桥连接到四个端子 [3]。在实践中, 每个终端都存在用于抑制并联相邻模块之间峰值充电平衡电流的终端电感器 [22]。图 1 显示了特定的终端电感器。在仿真中, 终端电感器不

会影响测试结果，因为它会忽略并且不会在模型中演示。图 1 说明了几种端口电感器类型。这种从并联到串联之间的特殊动态过渡具有开关电容变换器的一些性能，开关电容变换器具有平衡能力。此外，并联降低了桥臂电流分布中的传输损耗。此外，并联状态下电压不发生变化，因此采用它来代替旁路状态，实现上述优点。

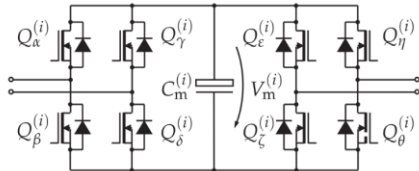


图 1.a) .FB-MBSM [22]

1.2 全桥多母线子模块(FB-MBSM)STATCOM

仿真拓扑

为了使系统产生或吸收无功功率，STATCOM 拓扑的子模块采用 FB-MBSM 拓扑。如果使用 HB-MBSM，则每相连接的臂只产生正阶梯电压，无法满足项目目标。图 2 展示了 STATCOM 仿真拓扑。它采用了 MMC 子模块的优点，简化了控制方法，不需要变压器。提出了 STATCOM 通过不同于传统 MMC 的三角形连接并联到三相交流系统。该 STATCOM 采用三角形连接方式注入循环电流，因此可配备储能系统 (ESS)。这些将在后面描述。

传统的 MMC 通常分为上下臂，连接方式为星形[4][5]。两种接线方式之间的差异将影响线电压相电压和线电流相电流的算法。

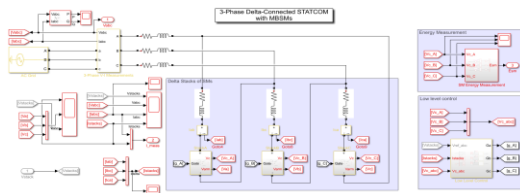


图 2. FB MBSMs 的三相三角形连接 STATCOM

在三角形连接中，线电压等于相电压，线电流是相电流的 $\sqrt{3}$ 倍。在星形连接中，线电压的大小是相电压的倍。线电流和相电流相同。下面

的方程式说明了它们之间的关系。

$$\text{三角形连接: } V_{\text{line}} = V_{\text{pk ase}} \quad I_{\text{line}} = \sqrt{3}I_{\text{pk ase}}$$

$$\text{星形连接: } V_{\text{line}} = \sqrt{3}V_{\text{pk ase}} \quad I_{\text{line}} = I_{\text{pk ase}}$$

STATCOM 分为 A、B、C 三相，每个阶段有一个 FB-MBSM 堆栈 (Stack)。FB-MBSM 堆栈由 FB-MBSM 组成，如图 3 所示。

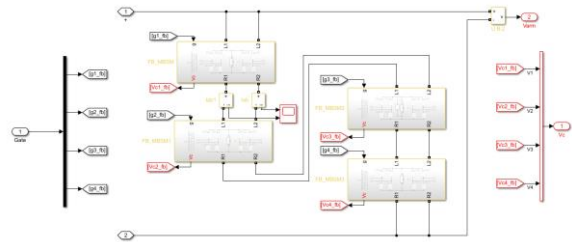


图 3.A 相 FB-MBSM 堆栈

图 4 显示了 A 相中的 FB-MBSM 堆栈，两侧是接收开关状态信号的接收器。外部低电平控制将该值输入特定的算法，然后输出开关状态信号，这也将下一部分中详细描述。每个 MBSM 的每一侧通过两个端子相互连接。当输入一个信号时，MBSM 将根据信号值在并联和串联模式之间动态切换，以输出合适的电压。

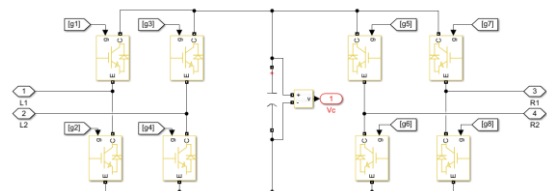


图 4.Simulink 中的 FB-MBSM 拓扑

由八个 IGBT 组成的 Simulink 中的 FB-MBSM。每个 IGBT 都有一个输入信号，其中包含随系统运行而变化的开关状态值。

2 储能与 MBSM 的集成

2.1 储能系统的构建

目前，世界范围内的供电系统是以大机组、大电网、高电压为主要特征的集中式单电源供电系统。尽管世界上 90% 的电力负荷都由这个集中的单一电网供电，但当今社会对能源和电力供应的质量、安全性和可靠性的要求越来越高，而大电网由于自身的缺点无法满足这一要求 [28]-[29]。大型电网中任何一点故障引起的扰动

都将对整个电网产生重大影响。在严重的情况下，它可能导致大规模停电甚至整个网络崩溃，造成灾难性后果。这种事故在一些国家经常发生。此外，集中式大型电网无法跟踪电力负荷的变化，而是为短期峰值负荷而建。发电厂成本巨大，经济效益也很低。根据以上经验，大电网系统与分布式发电系统的结合是节约投资、降低能耗、提高系统安全性和灵活性的主要方法[1]。分布式发电是指在用户现场或电力现场附近配置较小的发电机组（一般小于 30MW），以满足特定客户的需求，支持现有配电网的经济运行，或同时满足这两方面的要求。这些小型装置包括燃料电池、小型燃气轮机、小型光伏发电、小型风能-太阳能混合发电或燃气轮机和燃料电池的混合装置。靠近用户可提高服务可靠性和电能质量。技术发展、公共环境政策和电力市场的扩大使分布式发电成为新世纪的重要能源选择。

2.2 三角形 STATCOM 拓扑中带 ESS 的 MBSM

与系统传输线并联的 SM delta STATCOM 基于单桥单元（SDBC）[2]，该单元已在第 1 阶段项目中建模、检查和仿真。该装置的功能是通过调节电压来补偿系统的无功功率，提高系统的动态和稳态性能。但 SDBC 不仅具有 STATCOM 的性能，还被用作 ESS 的接口，并已被西门子用于商业用途。由于 MBSM 和 SDBC 的重叠程度非常高，MBSM 是 SDBC 的一种特殊形式。MBSM 还可以用作储能系统的接口。本文研究了部分储能系统的 MBSM 在不同条件下的性能。

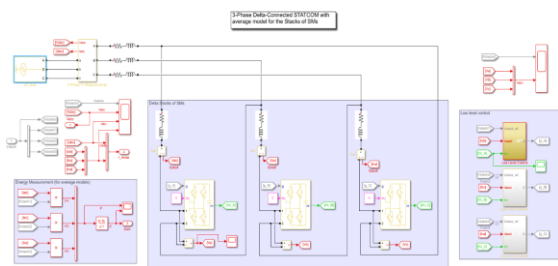


图 5. Simulink 中的 HBSM STATCOM 拓扑(单桥 SDBC)

接下来，介绍与 MBSM 接口的 ESS。由于大量的 MBSM 增加了仿真的运行时间，因此每个阶段的堆栈中只放置了四个 MBSM，以满足各种类型的仿真和讨论的需要。这种拓扑结构的

困难在于，并非堆栈的所有 MBSM 都连接到储能系统，而是部分 MBSM 连接到储能系统，以找到 MBSM 和储能系统值之间的关系。

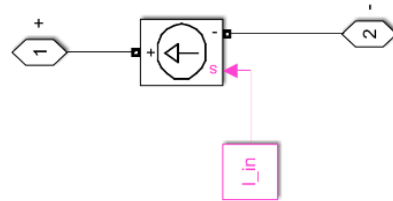


图 6.a) 带有 ESS 的 FB-MBSM b) Simulink 中 ESS 的模型

图 6 所示堆栈中的 MBSM 与 ESS 接口。由于模拟限制，ESS 暂时使用受控电流源来代替储能。通过改变注入电流 I_{in} 的量来控制储能系统中的能量量。

在仿真结果中，注入能量系统的电流值将影响 STATCOM 产生的有功功率。当注入电流为 0A 时，意味着系统仍然是由 MBSM 组成的 STATCOM，系统发送的无功功率始终为 0.02pu，系统吸收的有功功率为 -0.04pu，接近于 0。

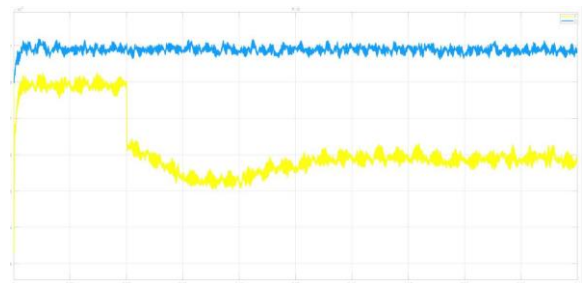


图 7. $I_{in}=0A$ 时的系统有功功率和无功功率（黄线表示有功功率，蓝线表示无功功率）

增加注入电流至 100A，系统有功功率输出增加至 0.12pu，无功功率保持在 0.02pu。注入电流增加到 300A 时，系统输出有功功率达到 0.6pu，无功功率也略有上升。增加储能能力。当电流设置为 500A 时，系统有功功率为 1.1pu，比无能量储备时高 1pu，无功功率仅增加 0.08pu。这充分表明 MBSM-ESS 增加了储能容量，使 STATCOM 能够输出有功功率，为系统提供电源支持。同时，对无功功率的影响可以忽略，不影响无功补偿精度。

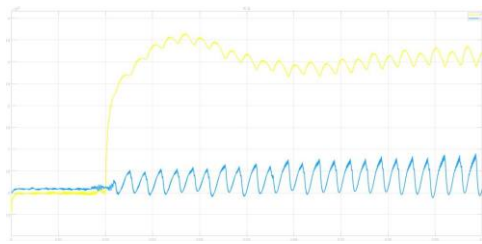


图 8. $I_{in}=300A$ 时的系统有功功率和无功功率
(黄线表示有功功率, 蓝线表示无功功率)

上述情况是当参考无功功率设置为 $0 pu$ 时, 此时我们必须调查无功功率的大小是否提高了系统的稳定性。

当能量电流为 $100A$ 时, 系统处于不平衡状态 (图 9)。在 $0.05-0.1$ 的模拟时间内, 堆栈电压波形产生一些自旋。因此, 尝试将参考无功功率增加到 0.15 。可以发现, 系统电压波形仍处于不平衡状态, 但与无参考无功功率时相比相对稳定。将参考无功功率修改为 0.25 (图 10)。系统成功地达到平衡, 波形看起来很平滑。这意味着, 当 STATCOM 中存在储能系统时, 系统平衡将受到干扰。将参考无功功率增加到一个特定范围, 消除 ESS 电流对系统的分配, 支持系统平衡。同时, ESS 电流为系统提供有功功率, 作为一项条件。

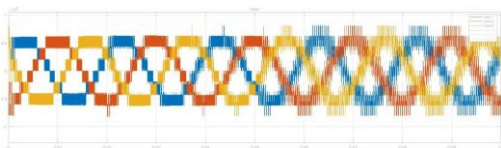


图 9. 堆栈电压波形 $Q_{reference}=0 I_{in}=100A$



图 10. 堆栈电压波形 $Q_{reference}=0.25 I_{in}=100A$

当能源系统的电流上升到相对较高的水平时, 参考无功功率也会随着电流成比例地线性增加, 以维持系统平衡。当 ESS 电流设置为 $300A$ 时, 参考无功功率需求为 $0.75 pu$ 。因此, 得出的结论是, 每 $100A$ 的能量电流, 需要 0.25 无功功率来消除系统的不平衡状态。当系统增加参考无功功率时, STATCOM 输出的有功功率降低。例如, 对于 $300A$ 的能量电流, 当参考无功功率为零时, 相应的有功功率为 $0.6 pu$, 但当参考无功功

率增加到 0.5 时, 有功功率降低到 0.5 。这意味着参考无功功率增加, 因为系统平衡功率将削弱 ESS 电流对系统输出有功功率的效率。因此, 并不是说参考无功功率越大, 这种新型 STATCOM 的性能就越好。ESS 电流和参考无功功率是寻找最佳点以实现效益最大化和经济性的必要条件。

当 ESE-SM 的数量占总数的 50% 时, STATCOM 产生的无功功率呈现整体下降趋势。由于无功功率本身很小, 下降的差异也较小。相反, 当 ESE-SM 比率增加时, STATCOM 的有功功率输出也会增加。增加值是 25% ESE-SM 情况下的两倍。例如, 当能量电流为 $100A$ 时, 50% ESE-SM 的有功功率为 $0.28 pu$, 而 25% ESE-SM 的有功功率仅为 $0.12 pu$ 。当能量电流达到 $300A$ 时, 50% ESE-SM 的有功功率为 $1.04 pu$, 25% ESE-SM 的有功功率仅为 $0.6 pu$ 。此外, 在前一章中提到, 通过增加参考无功功率来维持系统平衡将导致有功功率输出效率的损失, 在 50% ESE-SM 的情况下, 该损失保持不变。随着参考无功功率的增加, ESS 支持的有功功率减弱。衰减值差别不大。

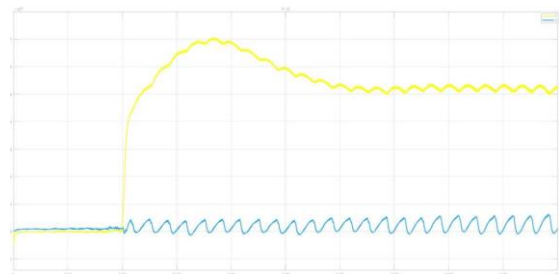


图 11. 50% ESE-MBSM 系统有功功率和无功功率
 $I_{in}=300A$ (黄线表示有功功率, 蓝线表示无功功率)

因此, 不难得出结论, ESE-SM 的比例将影响系统的有功功率和无功功率。ESE-SM 的比例越大, 输出的有功功率越多, 产生的无功功率越小。增加 ESE-SM 的比例不会改变 STATCOM 的初始性能。

2.3 带环流的 delta STATCOM 拓扑中的

ESE-MBSM

为了从 STATCOM 产生 $1 pu$ 有功功率, 每相 50% 的 MBSMs 必须连接到 ESS, 并且必须施加 $300A$ 的电流。

为了降低 ESS-SM 的比率和 ESS 电流的大

小。本文介绍了循环电流的概念。循环电流能够提取 ESE-MBSM 中的能量，然后流过三角形连接电路的每个组件，以最大限度地利用电路中的能量。例如，当 ESE-SM 仅与 2rd MBSM 连接时，该 ESE-SM 的电压仅在自身电容器上增加，而无循环电流。但是，当注入足够高的循环电流时，循环电流会将能量分配给其余三个未与 ESS 接口的 MBSM。注入循环电流后，它们之间的电压差减小。因为循环电流有助于它们的电压更加平衡。促进系统的平衡。

循环电流 I_{cc} 在仿真中的实现不是直接将循环电流注入 STATCOM 物理模型。通过控制器，循环电流被添加到电流参考模块。图 29 显示了循环电流的模拟方法。在电流参考块中采用正弦波块，并修改不同的频率，以替换不同谐波阶数的循环电流。图 30 中的 N 表示谐波数。一般来说，大多数 I_{cc} 更喜欢三次谐波电流。下文将讨论不同阶次谐波对循环电流效应的影响。

2.4 考虑循环回路后的仿真结果

对于含 25%ESE-SM 的 STATCOM，将 ESS 电流 I_{in} 设置为 100A，运行上述模拟后的结果表明，其输出相当大的有功功率。然而，MBSM 堆栈中每个电容器的电压值差别很大。图 36 显示了电容器的电压，单位为 MBSM。由于四个 MBSMs 中只有第三个具有 ESS 接口，因此第三个电容器的电压值明显高于其他三个电容器。电压差 V_{diff} 已达到 5×10^4 V，这是不科学和不经济的。将 ESS 电流保持在 100A。注入 100A 循环电流，观察电容器电压波形。从图 37 中得出，第三个电容器和其他三个电容器之间的电压差减小， $V_{diff} = 4 \times 10^4$ V。再次观察 STATCOM 的电压波形图 38。与图 31 相比，STATCOM 变得更加稳定，尽管它仍然处于不平衡状态。增加循环电流，直到系统达到平衡。循环电流 I_{cc} 的值为 285A，是储能电流的 3 倍。此外，当 STATCOM 没有 ESS 时，MBSM 的电容电压接近波形（图 39）。这种情况表明，注入循环电流可以成功地将电容器电压分配到每个相的每个子模块。从堆栈电压波形看，电压波形几乎完美，这也意味着循环电流能够改善系统平衡。与之前不注入循环电流时相比大幅降低。当循环电流为 100A 时，有功功率为 0.12pu。有功功率的变化证

明，循环电流将消耗大部分有功功率，从而降低有功功率的输出。结果违背了项目的初衷，也不是我们想要的结果。

在解决由循环电流引起的有功功率下降问题之前，首先要找到循环电流和 ESS 电流之间的关系。

注入电流 100, 200, 300&400 A—找到导致转换器平衡的循环电流 $S_{base} = 5e8$ 。随着 ESS 电流的增加，为了保持系统平衡，循环电流的振幅也会增加。当系统平衡时，循环电流振幅始终是 ESS 电流的 2.5-3 倍。ESS 电流越大，对循环电流的需求就越小。当 ESS 电流为 100A 时，需要 285A 的循环电流。当 ESS 电流为 400A 时，循环电流要求仅大于 ESS 电流的 2.4 倍，以维持系统平衡。

此外，即使循环电流抑制有功功率输出，变流器产生的有功功率也会随着 ESS 电流的增加而增加。

为了使系统处于平衡状态，产生更多的有功功率。它要求尽可能减少循环电流的注入。因此，增加 ESE-SM 的比率试图降低循环设定点。

将 ESE SMs 的数量增加到 2rd MBSM，找出导致转换器与不同 ESS 电流平衡的循环电流。在相同数量的 ESE SMs 下，将 ESS 电流设置为 100A，并观察不同 Q_{set} 值对变流器输出有功和无功功率的影响。建立 Q_{set} 和有功功率的直方图。从图 2 可以看出，在循环电流的情况下，改变参考无功功率的值对变流器输出的有功功率没有影响。改变参考无功功率仍将影响变流器的无功功率输出。此外，随着参考无功功率的增加，对循环电流的需求将减少。

最后一个案例是调查 1 ESE-SM 和注入电流下直流和不同谐波电流（1、3、5 和 7）所需的循环电流大小。

当注入直流循环电流时，转换器需要 3000A 的非常高的直流电流，以将 MBSM 电容器电压之间的差异保持在相对较小的范围内。然而，此时的系统是不平衡的。向系统注入第 5 次谐波循环电流。与三次谐波电流相比，第五次谐波电流无法保持系统平衡和 MBSM 电容器电压差之间的端接。为了降低电容器电压差，将第 5 次循环电流设置在 1000-1200A 范围内，此时堆栈电压波形将不理想。当第 5 次谐波电流为 500-800A 时，叠层电压

波形接近完美,但 MBSM 电容电压差异较大。第 7 次谐波性能与第 5 次谐波类似。

3 影响与开发

如前所述,在第二章中,可再生能源取代了传统的同步发电机发电,使频率在减少发电机的情况下变得更加敏感。

电网的频率通常为 50Hz。电网容量 3000MW 及以上的偏差不超过 $\pm 0.2\text{Hz}$,电网容量 3000MW 以下的偏差不超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。当电网受到干扰和故障时,发电机组采用惯性响应,以尽可能保持频率[31]。只有在系统受到干扰几秒钟后,一次频率储备才会激活操作储备。在此期间,由于旋转电机的减少,瞬时储备也减少了。因此,系统更容易超过临界频率,从而导致停电和甩负荷。为了维持瞬时储备,发电厂被迫运行。

如上所述,系统需要一个快速频率响应源来抵消惯性响应和操作储备之间的差距。

拟议的新型 STATCOM 是指西门子的 SVC PLUS,它将模块化多级 STATCOM 与储能系统(ESS)相结合。由于基于 MBSM 并行化的模块降低了 arm 电流分配中的传输损耗。当电网系统受到干扰时,它以快速频率响应(FFR)的形式向系统提供几秒钟的有功功率输出。这减轻了电网系统的压力,降低了停电和负荷转储的可能性。在正常情况下,该转换器充当 STATCOM,为系统提供无功功率。目前,这种新型 STATCOM 主要用于中压或低压系统。转换器不能足够维持高电压电平[1][3]。由于 PWM 频率限制。从西门子官方网站获得的数据表明,变流器产生的最大有功功率为 50MW,可产生的最大无功功率为 70Mvar[31]。

MBSM-STATCOM 的仿真模型尚不完善,由于时间限制,采用可控电流源代替超级电容器。在未来,我们可以找到合适的电力电子元件来替代可控电流源,并改进低电平控制算法来完善 STATCOM。

4.总结

本项目将具有降低传导损耗能力的 MBSM 与 ESS 相结合,形成一个能够在系统正常工作状态下补偿无功功率的系统。当系统受到干扰时,向系统提供短期有功功率以支持频率。

MBSM 有四个端子,通过控制信号控制 IGBT 的开关组合,实现同栈 MBSM 之间的并联/串联。MBSM 不同于 FBSM,因为只有两种开关状态,串联和并联。其中旁路被并联取代。因为当 MBSM 并联时,MBSM 的电容电压不会增加,同时传导损耗会降低。将 MBSM 投入到变流器中,该变流器成为 MBSM-STATCOM,用于实现系统的无功补偿。

随着分布式电力系统的建立,电网中传统同步电机的压力也越来越大。这导致故障发生时有功功率和低频率不足,可能导致甩负荷和停电。因此,迫切需要快速频率响应(FFT)。因此,介绍了一种储能系统(ESS)。

ESS 可在短时间内有效地向系统提供有功功率。ESS-MBSM 在模拟后得出以下结论。

增加 ESS 电流会增加 STATCOM 的有功功率输出。但 ESS 电流会导致系统不平衡。增加 Q_{set} 可以提高系统的稳定性,但会牺牲 ESS 提供的部分有功功率。增加 ESS-MBSM 在变流器中的比例可以在较低的 ESS 电流下提供相同数量的有功功率。另一方面,它也降低了 Q_{set} 的值。

循环电流能够提取 ESE-MBSM 中的能量,然后流过三角形连接电路的每个组件,以最大限度地利用电路中的能量。

在对循环电流进行研究之后。再次运行模拟。当 $Q_{set}=0$ 时,当 STATCOM 支持有功功率时,注入振幅为 ESS 电流 2.8 倍的循环电流可以保持系统平衡,同时减小电容器之间的电压差,使系统更加稳定。

然而,循环电流将消耗一些有功功率,使转换器效率降低。在这种情况下,增加 ESE-MBSM 的比例可以降低处于临界稳定点时所需的最小循环电流,从而提高转换器的效率。当向系统提供循环电流时,改变 Q_{set} 的值。 Q_{set} 的改变不再影响有功功率,只影响变流器的无功输出。

最后,研究循环电流的谐波阶数是否会影响结果。为了保持电容器的电压差在一个极小的值。

必须提供难以置信的大直流电流,系统的平衡无法维持。

第 5 次和第 7 次谐波具有相同的性能。当循环电流在 500-800A 范围内时,堆电压处于稳定状态,但不满足电容器电压差。如果循环电流增

加到 1000-1200A, 系统的平衡会变差, 但电容器电压满足要求。

因此, ESE-MBSM 比例和循环电流的组合能够提高变流器的效率, 并在产生有功功率的同时保持相对较低的损耗。ESE-MBSM STATCOM 提供快速频率响应服务, 提高了系统的稳定性, 也使电力系统更加经济。

参 考 文 献

- [1] Judge, P. D., & Green, T. C. (2018). Modular multilevel converter with partially rated integrated energy storage suitable for frequency support and ancillary service provision. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(1), 208-219.
- [2] Mian, S., Judge, P., Junyent-Ferre, A., & Green, T. (2020). A Delta-Connected Modular Multilevel STATCOM with Partially-Rated Energy Storage for Provision of Ancillary Services. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- [3] Goetz, S. M., Peterchev, A. V., & Weyh, T. (2014). Modular multilevel converter with series and parallel module connectivity: Topology and control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(1), 203-215.
- [4] Sharifabadi, K., Harnefors, L., Nee, H. P., Norrga, S., & Teodorescu, R. (2016). Design, control, and application of modular multilevel converters for HVDC transmission systems. John Wiley & Sons.
- [5] Du, S., Dekka, A., Wu, B., & Zargari, N. (2017). Modular multilevel converters: analysis, control, and applications. John Wiley & Sons.
- [6] Yang, Z., Shen, C., Zhang, L., Crow, M. L., & Atcitty, S. (2001). Integration of a StatCom and battery energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(2), 254-260.
- [7] Arulampalam, A., Ekanayake, J. B., & Jenkins, N. (2003). Application study of a STATCOM with energy storage. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 150(3), 373-384.
- [8] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (mmcc)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3119-3130, Nov. 2011.
- [9] Kobayashi, K., Goto, M., Wu, K., Yokomizu, Y., & Matsumura, T. (2003, June). Power system stability improvement by energy storage type STATCOM. In 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, (Vol. 2, pp. 7-pp). IEEE.
- [10] Cheng, Y., Qian, C., Crow, M. L., Pekarek, S., & Atcitty, S. (2006). A comparison of diode-clamped and cascaded multilevel converters for a STATCOM with energy storage. *IEEE transactions on industrial electronics*, 53(5), 1512-1521.
- [11] Goetz, S. M., Li, Z., Liang, X., Zhang, C., Lukic, S. M., & Peterchev, A. V. (2016). Control of modular multilevel converter with parallel connectivity—Application to battery systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(11), 8381-8392.
- [12] Gao, F., Niu, D., Tian, H., Jia, C., Li, N., & Zhao, Y. (2014). Control of parallel-connected modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(1), 372-386.
- [13] Gao, C., & Lv, J. (2017). A new parallel-connected diode-clamped modular multilevel converter with voltage self-balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(3), 1616-1625.
- [14] Yu, Q., Li, P., Liu, W., & Xie, X. (2004, April). Overview of STATCOM technologies. In 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies. Proceedings (Vol. 2, pp. 647-652). IEEE.
- [15] Singh, B., Saha, R., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2009). Static synchronous compensators (STATCOM): a review. *IET Power Electronics*, 2(4), 297-324.
- [16] Rao, P., Crow, M. L., & Yang, Z. (2000). STATCOM control for power system voltage control applications. *IEEE Transactions on power delivery*, 15(4), 1311-1317.
- [17] Bina, M. T. (2010). A transformerless medium-voltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(5), 1534-1545.
- [18] Liu, X., Lv, J., Gao, C., Chen, Z., & Chen, S. (2016). A novel STATCOM based on diode-clamped modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(8), 5964-5977.
- [19] Debnath, S., Qin, J., Bahrani, B., Saeedifard, M., & Barbosa, P. (2014). Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review. *IEEE transactions on power electronics*, 30(1), 37-53.
- [20] Yazdani, A., & Iravani, R. (2010). Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications. John Wiley & Sons.
- [21] Merlin, M. M. C. (2012). Hybrid multi-level HVDC converter and Multi-Terminal DC networks (Doctoral dissertation, Imperial College London).
- [22] Li, Z., Lizana, R., Sha, S., Yu, Z., Peterchev, A. V., & Goetz, S. M. (2018). Module implementation and modulation strategy for sensorless balancing in modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(9), 8405-8416.
- [23] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (mmcc)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 11, pp. 3119-3130, Nov. 2011.
- [24] C. Qian and M. L. Crow, "A cascaded converter-based statcom with energy storage," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting. Conf. Proc.*, 2002, vol. 1, pp. 544-549.
- [25] I. Trintis, S. Munk-Nielsen, and R. Teodorescu, "A new modular multilevel converter with integrated energy storage," in *Proc. 37th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, Nov. 2011, pp. 1075-1080.
- [26] M. Schroeder, S. Henninger, J. Jaeger, A. Ra's, H. Rubenbauer, and H. Leu, "Integration of batteries into a modular multilevel converter," in *Proc. 15th Euro. Conf. Power Electron. Appl.*, Sep. 2013, pp. 1-12.
- [27] Li, B., Yang, R., Xu, D., Wang, G., Wang, W., & Xu, D. (2014). Analysis of the phase-shifted carrier modulation for modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(1), 297-310.
- [28] B. Kroposki et al., "Achieving a 100 percent Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renew-able Energy," *IEEE Power and Energy*

- Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 61–73, Mar. 2017.
- [29] M. G. Dozein and P. Mancarella, “Application of Utility-Connected Battery Energy Storage System for Integrated Dynamic Services,” in 2019 IEEE Milan PowerTech. Milan, Italy: IEEE, Jun. 2019, pp. 1–6.
- [30] Willis, H. L. (Ed.). (2018). Distributed power generation: planning and evaluation. Crc Press.
- [31] Siemens “Frequency and voltage support for dynamic grid stability”
www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/flexible-ac-transmission-systems/svcplus-frequency-stabilizer.html

收稿日期: 2021 年 9 月 23 日

作者简介:

周金辉 (1983 年), 男, 黑龙江哈尔滨人, 现担任国网浙江省电力有限公司电力科学研究院互联网技术中心智能配网研究室主任。

马文皓 (1996 年), 男, 浙江杭州人, 工学硕士, 毕业于英国爱丁堡大学高级电气工程专业, 现就职于国网浙江省电力有限公司电力科学研究院互联网技术中心智能配网研究室, 研究方向为多母线子模块化应用。