基于MMC原理STATCOM实时仿真研究

MMC换流器作为一种新型换流器，具备降低系统谐波含量、无须交流滤波器配置、降低模块开关频率和降低设备损耗等优点。STATCOM作为一种静态无功调节装置，能够平滑实现系统无功功率调节、动态响应快，能够准确实现无功无差调节。基于上述优势，在PSCAD\EMTDC搭建基于MMC换流器结构模型STATCOM仿真系统，并进行直流电压控制器设计、无功功率控制器设计和交流电压控制设计。在稳态模式和动态模式下，分别对上述控制器进行仿真验证。

赵艳玲　王明清／乐山职业技术学院机电工程系

赵艳玲／副教授

关键词／Keywords

STATCOM ·
PSCAD\EMTDC ·
直流电压 ·
交流电压 ·
无功控制 ·
仿真 ·

STATCOM作为一种新型无功调节装置，采用全控型IGBT器件代替传统的半控型晶闸管器件，具有动态响应更快、无功调节更加精确等优点。MMC换流器作为一种新型换流器件，相对于两电平、三电平换流器件，大大降低系统开关频率，使得系统耗能更低。经逆变后交流电压、电流谐波含量更小，完全可以省去用于滤除高频谐波的交流滤波器，更加节省占地面积。PSCAD/EMTDC作为一种电磁暂态仿真软件，可以准确实现对换流器桥臂子模块特性模拟以及桥臂电抗及交流系统模拟，仿真结果更加接近实际系统运行效果。

本文提出的基于MMC结构的STATCOM仿真系统，换流器桥臂结构基于MMC链式结构设计，整个仿真模型建立基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建，并进行相关有功功率、无功功率控制逻辑设计，进行基于MMC原理STATCOM稳态性能以及动态性能研究。

STATCOM模型结构

本仿真系统由三部分构成，分别是交流系统、连接变以及换流器。换流器通过连接变压器、连接电抗与交流系统相连接，通过连接电抗完成换流器与交流系统无功功率交换。换流器基于链式MMC结构设计，依据交流系统实际需求，为交流系统提供无功功率或吸收无功功率，即提供容性无功功率或感性无功功率。具体无功功率控制模式选择，依据实际所接入交流系统需求，可以采用定无功功率控制模式或定交流电压控制模式。定无功功率控制模式下，按照功率参考值将无功功率调节至预设值；定交流电压控制模式下，通过向交流系统注入无功功率或从交流系统吸收无功功率，将交流系统电压稳定在预设值。

链式MMC模型结构

依据实际交流电网系统结构，该换流器结构模型及详细子模块模型如图1所

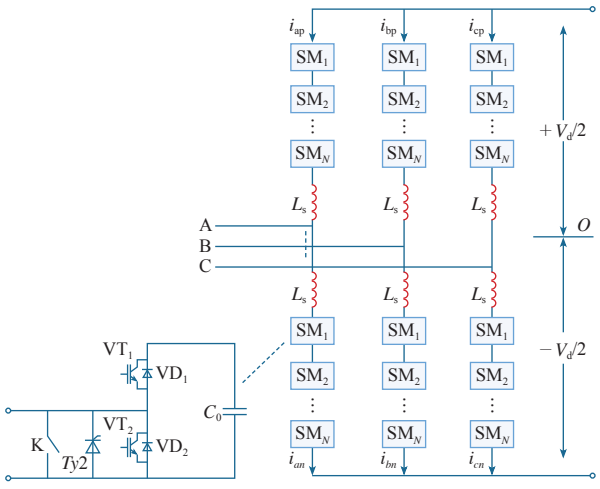

图1　链式换流器模型结构

中国知网　https://www.cnki.net

示。该换流器由A、B和C三相构成，每相包含上下两个桥臂，上下桥臂间通过串联桥臂电抗器构成。每个桥臂有N个储能子模块构成，正常运行过程中，通过对各个桥臂子模块投切，来确保直流母线电压稳定。子模块结构为半桥型，主要由两个IGBT器件反并联二极管构成，电容模块为储能模块，通过对IGBT开断控制，完成对电容模块投入、切除，实现电容电压输出目的，同时确保电容电压稳定。

STATCOM控制功能设计

STATCOM作为一种新型无功调节装置，主要用于如下两个场合，交流电压调节或者无功功率调节。交流电压调节主要用于稳定交流母线电压，以所接入交流电网电压为控制目标，当交流电网电压低于预设值时，发出无功功率以提高交流母线电压；当交流电网电压高于预设值时，吸收无功功率，降低交流母线电压。无功功率调节为静态调节方式，不受接入交流母线电压影响，按照预设无功功率参考值，调节换流器发出或吸收无功功率。交流电压控制功率逻辑框图以及无功功率控制逻辑框图分别如图2、图3所示。

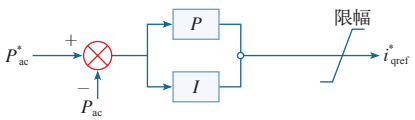

图2　稳态定无功控制原理框图

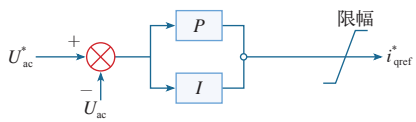

图3　定交流电压控制逻辑原理框图

STATCOM在稳定运行过程中，控制器除负责完成无功功率控制或交流电压控制外，还要负责完成直流母线电压控制，将STATCOM直流输出母线电压稳定在预设值。该STATCOM模型结构为三相六桥臂模型结构，各个桥臂由N个储能子模块构成。具体控制过程中，总体控制策略在保证每相总体投入模块不变的情况下，通过控制各个桥臂子模块投入、退出数量，来保证直流母线电压稳定。子模块投入原则一般是在充电情况下，将子模块电压最低子模块投入；在放电情况下，将子模块电压最高子模块投入；以此来保证各个桥臂、各个子模块电压均处在正常范围内。定直流电压控制逻辑原理如图4所示。

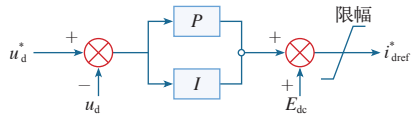

图4　定直流电压控制逻辑原理框图

系统仿真及结果分析

1. 仿真系统搭建

为实现上述STATCOM仿真模型搭建，并对上述控制逻辑进行优化研究。本仿真系统在PSCAD4.2版本上完成上述系统搭建，仿真模型搭建分为两个部分，即一次系统模型搭建以及控制逻辑搭建。鉴于PSCAD在电磁暂态仿真领域优越性，在具体一次系统搭建过程中，采用与实际工程一致的参数完成各个部件搭建。具体包括交流系统模型、子模块结构模型和连接变压器模型等。控制逻辑搭建具体包括直流电压控制器设计、无功功率控制器设计以及交流电压控制器设计。此外还包括为完成上述控制器设计所需其他附加功能设计，如DQ变换设计等。

2. 仿真结果分析

图5～图10分别为直流电压控制模式下、无功功率控制模式下和交流电压控制模式下稳态控制及动态控制仿真结果。下面将进行详细分析。

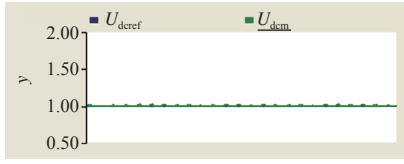

图5　稳态下直流电压控制值、参考值对比

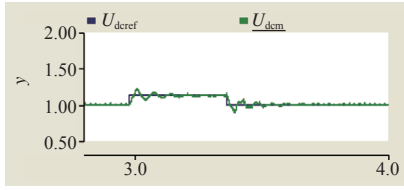

图6　动态下直流电压阶跃控制值、参考值对比

中国知网 https://www.cnki.net

图5为定直流电压控制模式下，STATCOM稳态输出电压波形。对图5分析可知，本文设计的直流电压控制器能够准确控制直流电压，稳态运行过程中，实际输出电压跟踪直流电压参考值变化。图6为定直流电压控制模式下，直流电压阶跃变化波形。对图6分析可知，直流电压参考值阶跃变化后，通过直流电压控制器作用，STATCOM输出快速响应直流电压参考值变化，将直流电压升至阶跃目标值，并在目标值稳定运行。

图7为定无功功率控制模式下，STATCOM稳态无功功率。由图7可见，稳态运行过程中，无功功率参考值为零，STATCOM在无功功率控制器控制作用下，无功功率输出为零。图8为无功功率阶跃变化波形。对图8进行分析，无功功率参考值阶跃变化后，要求STATCOM提供容性无功功率，为交流系统电压提供支撑。无功功率控制器快速响应无功功率参考值变化，无功功率阶跃上升，跟随无功功率参考值变化。

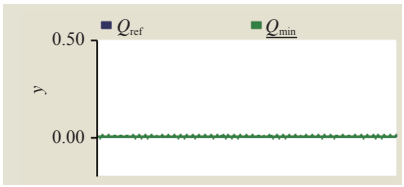

图7　稳态下无功功率控制值、参考值对比

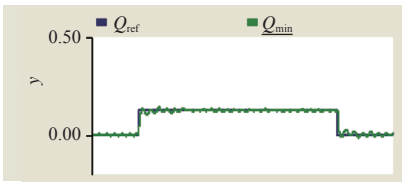

图8　动态下无功功率阶跃控制值、参考值对比

图9、图10分别为定交流电压控制模式，稳态交流电压波形和动态交流电压阶跃波形。由图9可见，STATCOM通过调节自身无功功率输出，能够将交流母线电压稳定在预设值。由图10可见，交流电压参考值变化后，STATCOM快速响应交流电压参考值变化，向交流系统注入感性无功功率，

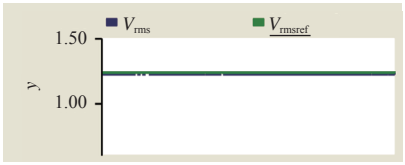

图9　稳态下交流电压控制值、参考值对比

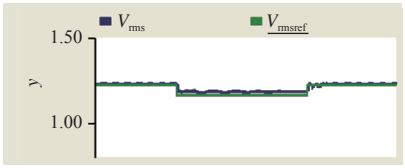

图10　动态下交流电压阶跃控制值、参考值对比

降低交流母线电压，将交流母线电压稳定在阶跃后电压参考值处。

综合上述分析，本文设计的直流电压控制器、无功功率控制器和交流电压控制器能够准确实现对直流电压的稳态控制、无功功率的稳态控制以及交流电压的稳态控制。动态过程中，能够快速响应参考值的变化，实现对直流电压参考值、无功功率参考值和交流电压参考值的动态跟踪。

结束语

本文基于MMC换流器技术，在PSCAD/EMTDC仿真平台搭建STATCOM仿真系统，并对本文设计的有功控制器、无功控制器进行逻辑搭建及仿真验证。具体仿真试验包括直流电压控制模式下的稳态、动态性能试验，无功功率控制模式下的稳态、动态性能试验，交流电压控制模式下稳态、动态性能试验。给出稳态下仿真结果及动态下仿真结果，并对上述仿真结果进行分析。仿真结果证实，本文所提出的直流电压控制策略、无功控制策略以及交流电压控制策略是有效的，能够准确实现对上述相关参量的稳态及动态控制。本文所开展的工作，对开展实际工程研究分析具有一定的借鉴意义。

（收稿日期：2015－02－10）EA

中国知网　https://www.cnki.net