

「控制系统」

柔性直流输电系统启动控制策略研究

文/苏州信息职业技术学院 顾玉娥

基于MMC的两端及多端柔性直流输电系统，根据换流站充电策略的不同需要设计不同的启动模式，又由于不控充电过程中存在功率模块电容电压发散问题及多站启动时存在启动顺序等问题，需要合理的启动策略来保证基于MMC的柔性直流输电系统启动的安全可靠性。根据柔性直流输电系统换流站的充电策略分别设计了基于MMC的两端柔性直流输电系统的启动模式和多端柔性直流输电系统的启动模式。

两端点对点直流系统启动模式

两端点对点柔性直流系统的换流站根据功率传输需求分为受端站和送端站，受端站接受功率传输至负荷，送端站连接送端电网提供直流系统有功功率。同时考虑两端点对点直流系统的四象限运行，即实现功率的双向流动，所以两端换流站既可以作为受端站又可以作为送端站，没有实质区别。基于MMC的两端点对点直流系统拓扑结构如图1所示，将左侧站称为换流站1，另外一站称为换流站2，换流站1和换流站2既可以连接强电网也可以连接弱电网或者无源网络。

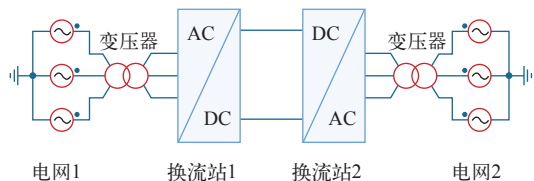


图1 两端点对点柔性直流系统拓扑

MMC拓扑结构的柔性换流站启动方式既可以通过交流电网进行充电启动，也可以在直流侧进行预充电，基于此两端柔性直流系统的启动模式可以分为两种。

1) 换流站1交流侧充电启动，换流站2直流侧充电启动，称之为点对点柔直启动模式1。

2) 换流站1交流侧充电启动，换流站2交流侧充电启动，称之为点对点柔直启动模式2。

MMC拓扑结构的点对点柔性直流输电系统启动前换流站1和换流站2的直流侧连接在一起，各自的交流侧通过交流断路器连接交流电网。

对比两种启动模式可以得出如下结论。

1) 在启动过程中，两种模式均需要换流站1通过交流侧充电启动，建立直流母线电压。

2) 启动模式2需要换流站2必须连接强电网，但启动模式1对换流站2不设置要求，既可以连接强电网，也可以连接无源网络或者弱电网。

3) 点对点启动模式1仅需要在换流站1的交流侧设置预充电电阻，增加的外电路较少，启动模式2则需要换流站1和换流站2的交流侧均设置预充电电阻。

4) 采用启动模式1时需要通过换流站1的充电电阻对换流站1和换流站2的子模块电容进行充电，而采用启动模式2时两端换流站各自通过自己的充电电阻对功率模块电容进行充电，所以两端柔直启动模式1的预充电电阻设计容量比两启动模式2的预充电电阻设计容量要大。

5) 启动模式1需要换流站1进行交流侧预充电启动, 换流站2进行直流侧预充电启动, 启动模式2的换流站1和换流站2仅需要交流侧预充电启动, 比启动模式1程序实现简便。

综上所述, 点对点柔直启动模式2仅适用于两端换流站均连接强电网情况, 而启动模式1不仅能够适用于两端换流站均连接强电网情况, 也能适用于一端换流站连接弱电网或者无源网络的情况, 如风电并网, 孤岛供电等场合。

多端柔性直流系统启动模式

当多个交流系统需要互联时, 需要采用多端直流输电系统。基于MMC的多端柔性直流输电系统是由3个或3个以上换流站通过直流输电线路连接组成, 可以解决多电源供电或多落点受电的输电问题。多端柔性直流输电系统中必须有一个换流站控制直流电压, 称为主站, 其余各站实现功率分配, 称为从站。图2给出了基于MMC拓扑的四端柔性直流输电系统示意图。

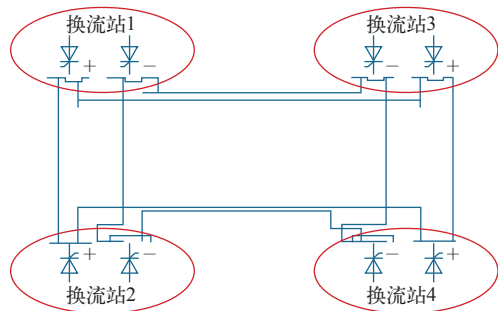


图2 多端柔性直流输电系统示意图

主站换流站一般设计为连接强电网, 接收从站发来的功率或者向从站发出功率。基于 MMC 的多端柔性直流系统的启动模式可以分为3种。

1) 第一种为主站交流侧预充电启动, 从站全部直流侧充电启动, 定义为多端启动模式1。

2) 第二种为主站交流侧预充电启动, 部分从站交流侧预充电启动, 其余从站直流侧充电启动, 定义为多端启动模式2。

3) 第三种为主站和从站全部交流侧预充电启动, 定义为多端启动模式3。

系统启动前所有换流站通过交流侧断路器与各自电网断开, 直流侧连接在一起。以三端柔性直流系统为例分析MMC换流站的多端柔性直流系统的启动模式, 换流站1作为主站, 换流站2和换流站3作为从站。多端柔直启动模式1中换流

站1交流侧预充电启动, 换流站2和换流站3直流侧预充电启动; 多端柔直启动模式2中换流站1交流侧预充电启动, 换流站2交流侧预充电启动, 换流站3直流侧预充电启动多端柔直启动模式3中换流站1、换流站2和换流站3全部交流侧预充电启动。

多端柔直启动模式1的实现步骤如下。

1) 换流站1闭合交流侧断路器, 投入预充电电阻, 进行交流侧不控整流充电; 换流站2和换流站3通过直流线路进行直流侧不控充电。

2) 换流站1切除预充电电阻, 进行交流侧可控充电, 使直流母线电压达到额定值, 子模块电容电压达到额定值; 换流站2和换流站3通过直流侧进行不控充电, 子模块电容电压最高到0.5pu。

3) 换流站1并网运行, 稳定直流母线电压; 换流站2和换流站3脉冲启动, 进行直流侧可控充电, 使子模块电容电压达到额定值。

4) 换流站1并网运行, 稳定直流母线电压; 换流站2和换流站3闭合交流侧断路器, 并网运行。

5) 系统启动成功。

多端柔直启动模式2的具体实现步骤如下。

1) 换流站1闭合交流侧断路器, 投入预充电电阻, 进行交流侧不控整流充电; 换流站2闭合交流侧断路器, 投入预充电电阻, 进行交流侧不控充电; 换流站3通过直流线路进行直流侧不控充电。

2) 换流站1切除预充电电阻, 脉冲启动进行交流侧可控充电, 使直流母线电压达到额定值, 子模块电容电压达到额定值; 换流站2切除预充电电阻, 并网运行, 给定有功、无功功率为0; 换流站3进行直流侧不控充电, 子模块电容电压最高0.5pu。

3) 换流站1并网运行, 控制直流母线电压稳定; 换流站2并网运行, 给定有功、无功功率为0; 换流站3脉冲启动进行直流侧可控充电, 使子模块电容电压达到额定值。

4) 换流站1并网运行, 稳定直流母线电压; 换流站2并网运行, 给定的有功、无功功率为0; 换流站3闭合交流侧断路器, 并网运行。

5) 系统启动成功。

多端柔直启动模式3的具体实现步骤如下。

1) 换流站1闭合交流侧断路器, 投入预充电

电阻,进行交流侧不控整流充电;换流站2闭合交流侧断路器,投入预充电电阻,进行交流侧不控整流充电;换流站3闭合交流侧断路器,投入预充电电阻,进行交流侧不控充电。

2) 换流站1切除预充电电阻,进行交流侧可控充电,使直流母线电压达到额定值,子模块电容电压达到额定值;换流站2切除充电电阻,并网运行,给定的有功、无功功率为0;换流站3切除预充电电阻,并网运行,给定的有功、无功功率为0。

3) 换流站1并网运行,控制直流母线稳定;换流站2和换流站3并网运行,控制系统功率。

4) 系统启动成功。

对比3种启动模式可知如下结论。

1) 3种启动模式都要求主站进行交流侧预充电启动,建立直流母线电压。

2) 多端柔直启动模式2和两端柔直启动模式3仅适用于从站连接强电网的情况;而多端柔直启动模式1不仅可以适用于从站连接强电网的情况也可以适用于从站连接无源网络或者弱电网的情况。

3) 多端柔直启动模式1仅需要在主站的交流侧设置预充电电阻,增加的外电路较少;多端柔直启动模式2则需要主站和部分从站的交流侧设置预充电电阻;多端柔直启动模式3则需要主站和全部从站的交流侧设置预充电电阻,电路最为复杂。

4) 多端柔直启动模式3所有换流站均进行交流侧充电启动,程序实现最为简便;多端柔直启动模式1主站需要交流侧充电启动,所有从站需要直流侧预充电启动,程序实现最为复杂。

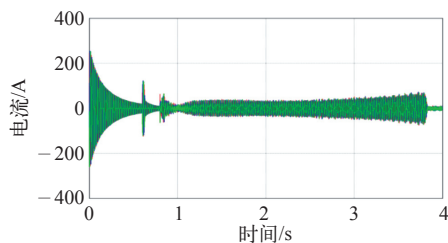
综上所述,多端柔直启动模式1通用性最好,可以适用于多端柔性直流输电的全部应用场合,但是程序实现最复杂,一旦主站出现故障,整个系统将无法启动,所以必须有从站作备用主站设置;多端柔直启动模式3仅能适用于所有换流站连接强电网情况,但是程序实现最简单;多端柔直启动模式2介于两者之间。

仿真验证

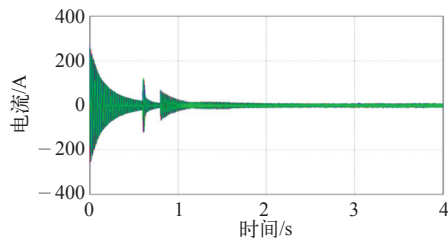
他由于多端柔直启动模式2的启动策略包含了其它启动模式下的启动策略,所以只需对多端柔直启动模式2的启动策略进行仿真就可以验证提出

的不同启动模式下启动策略的有效性。构建基于MMC的三端柔性直流输电系统仿真电路。其中换流器1作为主站通过交流侧充电启动并控制直流母线电压,换流器2和换流器3作为从站。

图3a为换流器1的三相电网电流,图3b为换流器2的三相电网电流。从图中可以看到0.8 s后主要是换流器1在提供系统子模块电容充电的能量,且整个充电过程中没有出现较大的电流冲击,启动过程平稳。



(a) 换流器1的三相电网电流



(b) 换流器2的三相电网电流

图3 启动电网电流波形

结束语

在MMC充电策略的基础上提出了基于MMC的两端及多端柔性直流系统的启动模式。两端柔直启动模式2比柔直启动模式1实现简便,两端柔直启动模式2仅适用于两端换流站均连接强电网情况,而两端柔直启动模式1不仅能够适用于两端换流站均连接强电网情况,也能适用于一端换流站连接弱电网或者无源网络的情况。多端柔直启动模式1通用性最好,可以适用于多端柔性直流输电的全部应用场合,但是程序实现最复杂,一旦主站出现故障,整个系统将无法启动,所以必须有从站作备用主站设置;多端柔直启动模式3仅能适用于所有换流站连接强电网情况,但是程序实现最简单;多端柔直启动模式2介于两者之间。EA

(收稿日期:2017.06.19)

(编辑:刘群彦)