

文章编号:1005-0523(2016)03-0099-07

多端直流输电系统中直流电压协调控制策略研究

吴继珍, 宋平岗, 罗 剑

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:多端直流系统中直流电压的稳定是整个系统的核心,需要各个换流站之间协调控制,共同维持整个直流电网的稳定运行,目前直流电压协调控制策略主要分为有通信和无通信两大控制策略。针对基于模块化多电平换流器型多端直流输电系统(MMC-MTDC),在介绍 MMC 的基本运行原理的基础上,论述了 MTDC 系统中两大系统协调控制策略,重点分析并设计了无通信类的 3 种控制器;旨在对现有的 MTDC 直流电压协调控制策略做出一个总结,为后续 MTDC 控制策略的研究提供技术参考;最后通过一个五端 MMC-MTDC 仿真模型验证和对比不同直流电压协调控制器的性能优缺点。

关键词:多端直流输电;模块化多电平换流器;直流电压;协调控制;无通信控制策略

中图分类号:TM933

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.03.016

基于电压源换流器(voltage source converter, VSC)的高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)系统,可以独立调节有功和无功功率,不存在换相失败问题以及可向独立负荷供电,非常适合远距离大容量输电、海上风电并网以及无源网络等供电领域。传统 VSC-HVDC 换流阀主要采用两电平或三电平 VSC,电压和容量等级严重限制该技术的进一步发展,且存在谐波含量高、开关损耗大的缺陷^[3]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑的提出使得 HVDC 成功突破了传统的技术约束,从而进入了一个迅猛发展阶段;MMC 模块化结构特性使得其具有适用于不同电压和容量等级、谐波含量低和开关损耗低等一系列优点^[1-4]。西门子公司首先将 MMC 运用于 HVDC 领域,建立了世界上第一个 MMC-HVDC 商业工程项目;我国在南汇风电场自主研发建设亚洲第一个 MMC-HVDC 工程^[5-6]。

多端柔性直流输电(multi-terminal high voltage direct current, MTDC)系统中,直流电压的稳定是整个 MTDC 系统的关键,需要多个换流站之间相互协调控制共同维持直流电压的稳定;因此有必要针对 MTDC 系统相关直流电压协调控制策略进行综述研究和分析对比。目前 MTDC 系统直流电压协调控制策略主要分为通信类和无通信类两大控制策略,通信类策略依赖通信技术实现各个换流站协调控制;而无通信类策略主要通过实时检测直流电压与功率,换流站内部根据实时检测的直流电压与功率,通过相关策略自动协调控制,

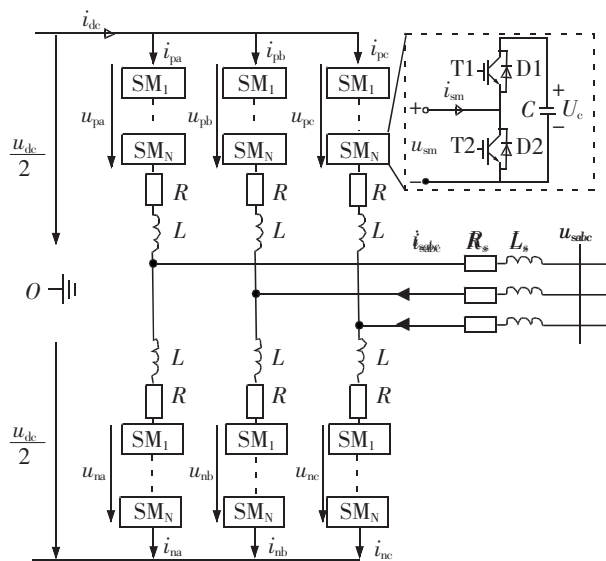


图1 MMC 基本拓扑结构
Fig.1 Basic topology of MMC

收稿日期:2015-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51367008)

作者简介:吴继珍(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。

通讯作者:宋平岗(1965—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术与新能源应用。

保证直流电压的稳定^[7-8]。本文在介绍 MMC 基本原理的基础上,针对 MMC-MTDC 系统中现有的直流电压协调控制策略机理进行综述;重点介绍无通信类系控制策略中的直流电压偏差控制、斜率控制和混合控制三大控制策略,并分别设计相关系统级控制器,对比分析三者之间的优缺点和应用局限;最后在 PSCAD 仿真平台中搭建五端高压直流输电仿真模型验证相关控制系统的有效性。

1 MMC 数学模型与控制策略

图 1 为 MMC 基本结构示意图。MMC 由 3 个相单元构成,每个相单元分为上、下两个桥臂(下文图和相关公式中电气量下标 p 表示为上桥臂,n 表示为下桥臂),每个桥臂由 N 个子模块(sub-module, SM)和桥臂阻感串联而成,子模块结构拓扑如图 1 虚线框内所示, u_{sm} 和 i_{sm} 为子模块输出电压和电流,D1,D2 为功率二极管,T1,T2 为 IGBT, C 为模块电容, U_c 为子模块电容电压。 L 为桥臂串联电感, R 为桥臂等效损耗电阻; i_{jp} 和 i_{jn} 为 MMC 第 $j(j=a,b,c)$ 相上、下桥臂电流, u_{jp} 和 u_{jn} 为上、下桥臂投入子模块的总电压; u_{sj} 为交流侧第 j 相电压, i_{sj} 为交流侧电流; R_s 和 L_s 为交流系统等值阻感; u_{dc} 和 i_{dc} 分别为直流电压和直流电流。

根据图 1 所示拓扑结构和基尔霍夫定律可知,MMC 与交、直流系统的动态方程^[9]:

$$\left. \begin{aligned} u_{sj} &= e_j + (R_s + \frac{1}{2}R)i_{sj} + (L_s + \frac{1}{2}L)\frac{di_{sj}}{dt} \\ u_{dc} &= u_{jp} + u_{jn} + 2Ri_{diff} + 2L\frac{di_{diff}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $e_j = (u_{ju} - u_{jp})/2$ 为 MMC 内部虚拟电动势; $i_{diff} = (i_{jp} + i_{jn})/2$ 为同时流经 MMC 上、下桥臂的内部不平衡电流,主要包含二倍频环流成分 i_{cirj} 和直流电流 i_{dc} 分量,并定义 u_{diff} 为 i_{diff} 在桥臂串联阻感 R 和 L 上产生的电压降,则 MMC 上、下桥臂的控制方程为

$$\left. \begin{aligned} u_{jp} &= \frac{u_{dc}}{2} - e_j - u_{diff} \\ u_{jn} &= \frac{u_{dc}}{2} + e_j - u_{diff} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

尽管相比于传统的两电平或三电平 VSC,MMC 具有明显的技术优势,但其存在子模块电容电压不平衡和相间环流的缺陷,实际上增加了 HVDC 换流阀级的控制难度;关于换流阀级与换流站级相关控制策略已有大量文献报道^[10-11],故本文不展开介绍。

2 MMC-MTDC 系统级控制策略

直流电压的稳定对于 MTDC 系统至关重要,要求至少有一个换流站运行在定直流电压模式;当运行在定直流电压的换流站出现故障退出运行时,其他换流站需要调整运行状态以维持直流电压稳定,这就需要设计 MTDC 系统级直流电压协调控制策略,协调控制各个换流站,系统级控制策略主要分为通信类和无通信类两大控制方式。无通信类控制策略主要分为直流电压偏差控制和直流电压斜率控制,同时也有相关改进型的混合控制策略,其均是根据检测直流电压和功率自动调节换流站自身的运行方式。

图 2 所示为一个基于 MMC 的五端直流输电系统,设定 MMC1 为系统的功率平衡节点,运行在定直流电压控制;MMC2 和 MMC3 运行于定有功功率和无功功率($P-Q$)模式;MMC4 工作于定有功功率和交流电压($P-V$)模式;MMC5 则向无源网络供电,运行于稳定交流输出电压幅值和频率($V-f$)模式。

2.1 主从控制策略

主从控制器属于带通信类控制器,各个换流

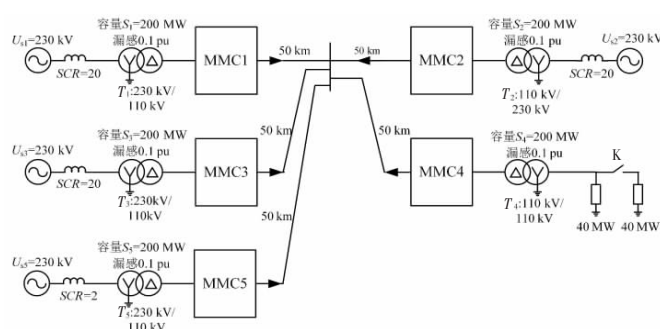


图 2 五端 MMC-MTDC 系统

Fig.2 Five-terminal MMC-MTDC system

站分为主站和从站;主站负责维持直流电压稳定即运行于定直流电压控制,从站一般运行有源控制状态即运行在定有功功率控制,且至少有一个从站具备切换到定直流电压控制的能力;当直流电网功率过剩或者不足时,直流电压降出现上升或下降,此时上层控制器命令从站切换运行模式以维持直流电压的稳定,从而实现整个 MTDC 系统的功率平衡。主从控制策略中上层控制器统一控制各个换流站的运行方式和分配各个换流站的功率出力,但主从控制高度依赖通信速度且控制不灵活。

2.2 直流电压偏差控制策略

直流电压偏差控制器又称电压裕度控制器,是从主从控制器所改进的。具备运行定直流电压控制模式能力的换流站(原先处于定功率控制),在定直流电压换流站退出后,能够检测到直流电压发生较大偏差后自动切换到定直流电压运行模式,从而起到稳定直流电压的作用。尽管直流电压偏差控制不再依靠通信方式切换换流站的工作模式,但仍然需要事先对某一个换流站外环控制器事先改造成直流电压偏差控制,在维持直流电压平衡的换流站退出后,被设定的换流站开始切换到定直流电压模式,本文设定 MMC2 具备直流电压偏差控制能力。

根据 MMC1 的工作模式,直流电压偏差控制器拥有 2 种工作模式。第一种模式工作原理如图 3(a)所示,正常工作下 MMC1 运行在整流模式向直流系统注入功率,直流电压参考值为 u_{dcref} ;当 MMC1 由于故障退出运行或容量达到限额时,直流系统内部功率会失衡,换流站注入到直流系统的功率将小于从直流系统吸收的功率,相应地直流电压会迅速下降。当直流电压下降到 MMC2 预先设定的低裕度值 u_{dcrefL} 时,MMC2 会自动切换工作模式,开始工作在定直流电压控制状态,其他换流站控制模式不做改变。系统快速恢复稳定,但和正常运行不同的是此时的系统直流电压稳定在 u_{dcrefL} ,此数值略小于 u_{dcref} ,MMC2 直流输出电流 $i_{dcl} = P_{2ref}/U_{dcrefL}$,大于正常运行时的直流电流 P_{2ref}/U_{dcref} ,此时 MMC 内环控制器 d 轴参考电流应该为 i_{dcl} 。

第二种模式工作原理如图 3(b)所示,MMC1 从直流侧吸收功率即工作在逆变状态;当 MMC1 由于故障退出运行或容量达到限额时,注入到直流系统的功率将大于从直流系统吸收的功率,相应地直流电压会迅速上升。当直流电压上升到 MMC2 预先设定的高裕度值 u_{dcrefH} 时,MMC2 开始工作在定直流电压控制状态,系统快速恢复稳定后直流电压稳定在 u_{dcrefH} ,MMC2 直流输出电流 i_{dcH} 小于正常运行时的直流电流,此时 MMC 内环控制器 d 轴参考电流应该为 i_{dcH} 。

根据上文分析,根据 2 种工作模式下直流电流和正常状态下直流电流之间的关系可设计直流电压偏差控制器,如图 4 所示。直流电压偏差控制器无需通信,换流站根据电压偏差即可调整运行模式,但在运行时

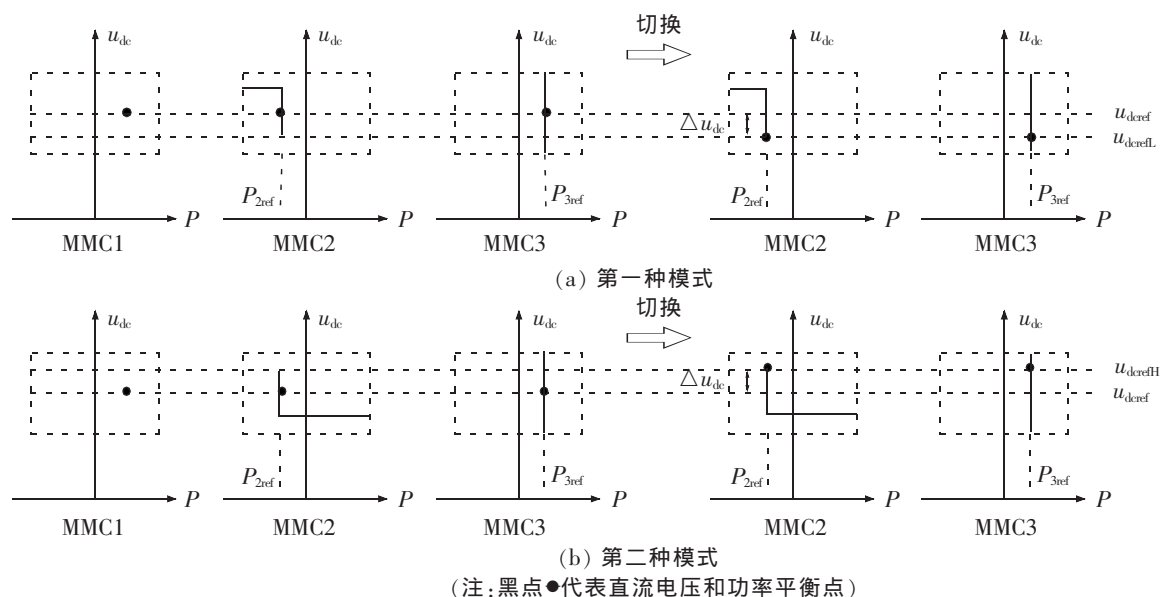


图3 直流电压偏差控制原理
Fig.3 Control theory of DC voltage error

只能有一个换流站工作于定直流电压控制,且随着换流站个数的增加各个换流站存在备用换流站投入优先级问题,增加控制系统的复杂程度。

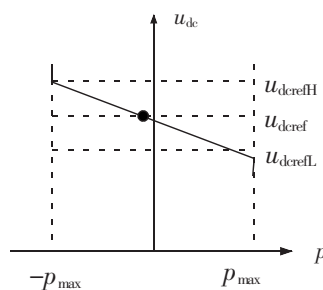
2.3 直流电压斜率控制策略

直流电压斜率控制策略又称直流电压下垂控制策略,是根据直流电压与换流器直流输出功率之间的关系设计的,换流站通过检测直流端口的直流电压按照一定的规律调节直流功率分配,从而实现多个换流站能够同时工作于定直流电压状态,避免单个换流站的容量限制整个 MTDC 的功率输送能力^[12]。

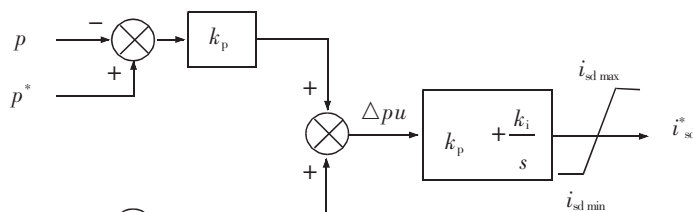
如图 5 所示为直流电压斜率控制策略的基本原理,当 MTDC 稳定运行时,直流电压和功率存在:

$$u_{dc} = u_{dcref} + k_p (P_{ref} - P) \quad (3)$$

式中: k_p 为直流电压-功率特性曲线的斜率。



(a) 直流电压-功率特性曲线



(b) 直流电压斜率控制器

图 5 直流电压斜率控制系统
Fig.5 DC voltage droop control system

设 MTDC 系统中有 X 个换流站参与稳定直流电压,即运行在直流电压斜率控制模式;在某一个时刻,直流系统有功潮流出现不平衡现象,需要各个换流站协调分配功率,此时对于第 X 换流站而言,由图 6 所示的直流电压-功率特性曲线,直流电压和功率之间的平衡点将发生漂移,结合式(3)可得:

$$\left. \begin{aligned} k_{px} &= \frac{u_{dc} - u_{dcref}}{P - P_{ref}} = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta P_x} \\ \Delta P &= \sum_{x=1}^X \Delta P_x \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: Δu_{dc} , ΔP 为整个 MTDC 直流电压和功率的偏移值; ΔP_x 为第 x 个换流站所承担的功率偏移值; k_{px} 为相应换流站的斜率。

根据式(4)可知各个换流站在直流系统出现功率波动时所分配的有功功率由斜率 k_{pm} 所决定,直流电压斜率控制器灵活性高,非常适合直流系统有功潮流频繁变化的系统中;但是直流电压-功率特性难以选取,直流电压-功率平衡点难以确定,各个换流站功率分配难以达到最优分配,且直流电压随着整个直流系统功率的变化将会出现一定波动,该缺点在复杂的 MTDC 系统中体现的更为明显。

2.4 直流电压混合控制策略

为了克服直流电压偏差控制和直流电压斜率控制固有的缺陷,文献[7-8, 13-14]分别设计一种直流电压偏差-斜率混合控制器,尽管不同文献设计的混合控制器存在一些区别,但控制器的基本思想可以利用

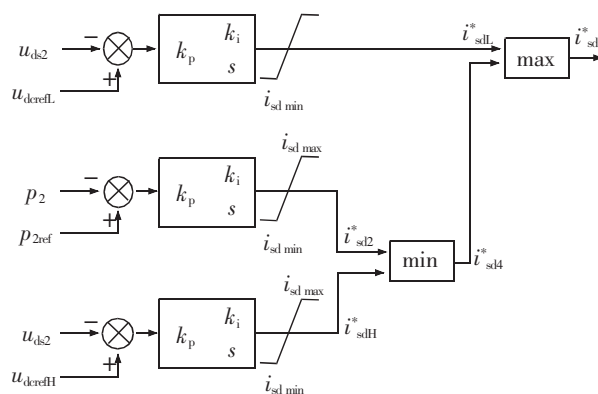
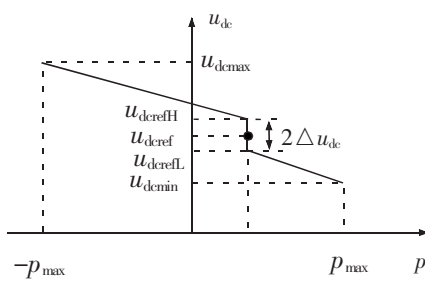


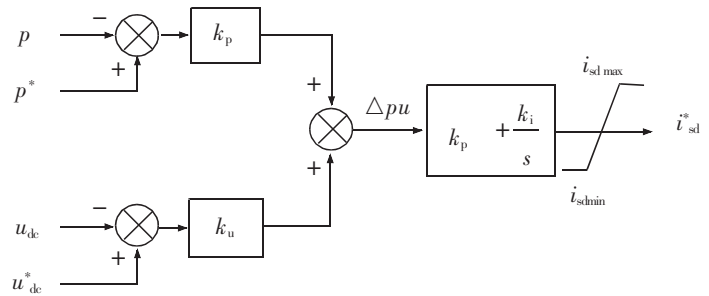
图 4 直流电压偏差控制器
Fig.4 DC voltage error controller

如图 6(a)所示的直流电压-功率特性曲线进行说明,即对 MTDC 系统换流站功率-直流电压特性曲线分段处理,在不同的阶段选取偏差控制和斜率控制。根据直流电压的实际值换流站一般具有 3 种运行方式:① 当直流电压 U_{dc} 在 $[U_{dcrefl}, U_{dcrefh}]$ 之间时,换流站处于直流电压偏差控制,直流端口输出的直流功率跟踪设定的参考值;② 当直流电压 U_{dc} 在 $[U_{dcrefl}, U_{dcrefl}]$ 和 $[U_{dcrefh}, U_{dcrefh}]$ 之间时,换流站运行于直流电压斜率控制状态,调整输出的直流功率以维持直流电压稳定,此时直流电压的参考值分别设定为 U_{dcrefl} 和 U_{dcrefh} ;③ 当直流电压大于限值 U_{dcrefh} 或小于 U_{dcrefl} 时,换流站必须启动保护策略限制交流系统的有功功率和有功电流。

如图 6(b)所示为本文根据直流电压斜率控制器所改进的直流电压混合控制器,根据直流电压斜率控制器的相关特性可令 $k_p=1$,改变 k_u 的值同样可以实现直流电压斜率控制;当 U_{dc} 在 $[U_{dcrefl}, U_{dcrefh}]$ 之间时, $k_u=0$;当 U_{dc} 在 $[U_{dcrefl}, U_{dcrefl}]$ 和 $[U_{dcrefh}, U_{dcrefh}]$ 之间时, k_u 的取值同样可以根据第 2.2 节相关参数选取原则确定,此时直流电压的参考值 u_{dc}^* 分别设定为 U_{dcrefl} 和 U_{dcrefh} ;当直流电压大于限值 U_{dcrefh} 或小于 U_{dcrefl} 时,通过对 i_{sl} 进行相应的限幅,保证整个直流输电系统的稳定。



(a) 直流电压-功率特性曲线



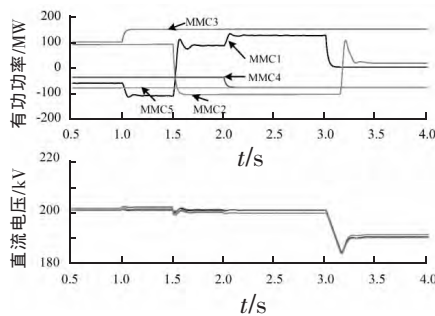
(b) 直流电压混合控制器

图 6 直流电压斜率混合控制系统

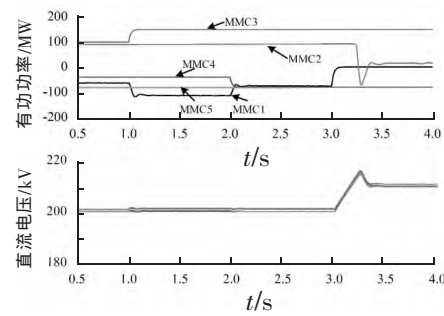
Fig.6 DC voltage hybrid control system

3 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 7 所示的五端 MMC-MTDC,各个 MMC 换流站阀级参数一致,子模块个数 N 为 50,子模块电容 C 为 12.5 mF,串联电感 L 为 10 mH,桥臂等效电阻 R 为 0.5 Ω ,直流电缆采用集中参数代替,线路等效电感为 0.01 MH $\cdot$ km $^{-1}$,等效电阻为 0.01 $\Omega\cdot$ km $^{-1}$;直流母线额定电压 U_{dc} 为 200 kV。



(a) 直流电压-功率特性曲线



(b) 直流电压混合控制器

图 7 直流电压偏差控制器仿真波形

Fig.7 Simulation waves of DC voltage error controller

1) 直流电压偏差控制: 仿真模型中,MMC2 有功功率的参考值为 100 MW,在 $t=1.5$ s 时指令切换为 -100 MW;MMC3 有功功率的参考值为 100 MW,在 $t=1.5$ s 时增加至 150 MW;MMC4 所连接的无源网络中,断路器 K 在 $t=2.0$ s 闭合,MMC4 输送至负载端的功率由 40 MW 变为 80 MW;MMC5 有功功率指令始终为 -80 MW。设置直流电压偏差范围为 ± 10 kV。

如图 7(a)所示,MMC1 作为功率平衡点,在 $t=0.5\sim 3.5$ s 时间段输送至直流系统的功率随着其他的换流站有功功率的变化而变化,说明 MMC1 具备调节直流电网功率分布的能力;在 $t=2.0$ s 后 MMC1 处于整流状

态。为了验证直流电压偏差控制器的有效性,在 $t=3.0\text{ s}$ 时 MMC1 退出运行,此时注入直流系统的功率小于被吸收的功率,MMC2 中的直流电压偏差控制器运行于第一种模式,当控制器检测到直流电压小于 190 kV 时,MMC2 运行方式切换到定直流电压控制方式;恢复至稳态后,直流母线电压始终维持在 190 kV ,说明处于直流偏差控制的 MMC2 在稳定直流电压的 MMC1 退出运行后,能够自动切换至定直流电压控制模式下,从而验证了直流偏差控制器的有效性。为了验证直流电压偏差控制器第二模式的有效性,将 MMC2 的有功功率参考值初始值始终设定为 100 MW ,其他换流站相关设定不变。如图 7(b)所示,在 $t=2.0\text{ s}$ 之后 MMC1 运行于逆变状态;MMC1 退出运行后,当直流电压大于 210 kV 时,MMC2 运行方式切换到定直流电压控制方式;恢复至稳态后,直流母线电压始终维持在 210 kV 。

2) 直流电压斜率控制:MMC1 和 MMC2 外环控制器设置成直流电压斜率控制器,初始功率均设置为 100 MW ,最大电压偏差为 $\pm 10\text{ kV}$,直流功率在 MMC1 和 MMC2 两个换流站之间均分,根据式(4)可求得斜率为 0.05 ;如图 8 所示,不管换流站 MMC3 和 MMC4 有功功率如何翻转,MMC1 和 MMC2 直流侧有功功率均保持均分状态;当 MMC1 退出运行后,MMC2 继续稳定直流电压但承担的有功功率为之前的 2 倍,直流电压始终维持在偏差范围内,验证了直流斜率控制策略的有效性。但是在直流电网在功率变化时,由于 MMC1 和 MMC2 的直流电压-功率平衡点不断发生变化,使得两个换流站的直流电压参考值不断更新,造成直流电压随着整个直流电网潮流变化而在参考值附件不断波动。

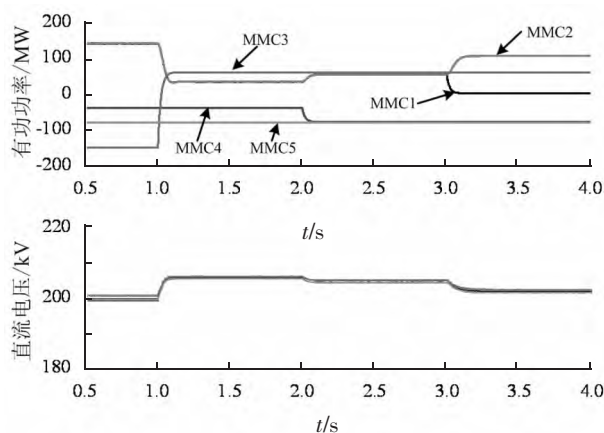
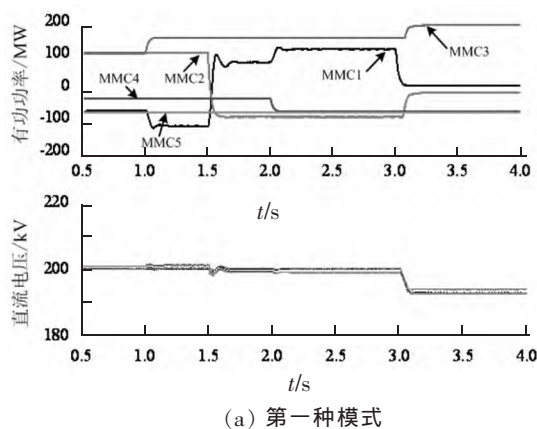
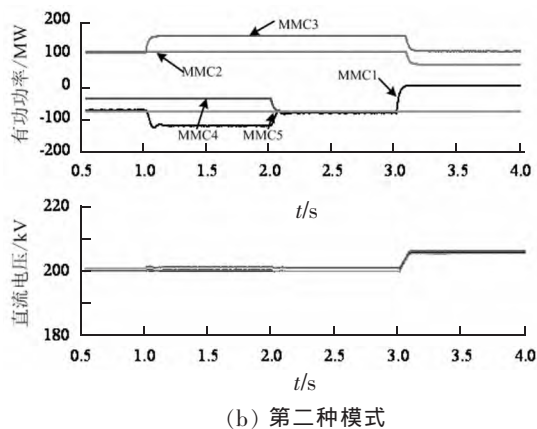


图 8 直流电压斜率控制器仿真波形
Fig.8 Simulation waves of DC voltage



(a) 第一种模式



(b) 第二种模式

图 9 直流电压混合控制器仿真波形

Fig.9 Simulation waves of DC voltage hybrid controller

3) 直流电压混合控制:设定 $U_{dcrefL}=195\text{ kV}$, $U_{dcrefH}=205\text{ kV}$, $U_{dcrefmin}=190\text{ kV}$ 和 $U_{dcrefmax}=210\text{ kV}$;同理于直流电压偏差控制,混合控制根据 MMC1 的工作状态同样分为两种模式,混合控制两种模式下各个换流站的相关参数设置同偏差控制。对比图 7 和图 9 可知,当 MMC1 退出运行时,MMC2 和 MMC3 共同维持直流电压的稳定;图 9 中在 MMC1 退出运行时,直流电压平滑过渡至新的参考值,并不会出现电压超调现象。对比图 8 和图 9 可知,在直流电网功率发生变化时,直流电压并不会出现明显的变化,仍然维持在 200 kV 。

4 结论

1) 介绍了 MMC 的基本运行原理、MTDC 通信类和无通信类两大系统级控制策略,在 PSCAD 仿真平台

上建立了相关仿真模型和控制器,仿真结果验证了所设计控制器的有效性。

2) 主从控制可以准确控制换流站的运行方式和功率分配,但依赖于通信技术的高速性和可靠性;无通信控制策略仅仅根据直流电压和功率的实时检测值自动协调控制各个换流站,在维持直流电压的稳定方面具备更强的灵活性。

3) 直流电压偏差控制时只能有一个换流站处于稳定直流电压状态下,且后备换流站切换成定直流电压控制是存在优先级问题;直流电压斜率控制可以有多个换流站参与稳定直流电压,但系统复杂时各个换流站的直流电压-功率特性曲线难以确定,容易导致直流有功功率分配不均;直流电压混合控制结合了前两者的优点,但斜率控制阶段功率分配仍然难以达到最优。

参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):3-14.
- [2] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2012:129-141.
- [3] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [4] DEBNATH S, QIN J, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [5] 宋平岗,李云丰,王立娜,等. 模块化多电平换流器效率优化控制器设计[J]. 高电压技术,2013,39(11):2730-2736.
- [6] 马为民,吴方劫,杨一鸣,等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术,2014,40(8):2429-2439.
- [7] 唐庚,徐政,刘昇,等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):125-132.
- [8] 吴金龙,刘欣和,王先为,等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术,2015(6):1593-1599.
- [9] 唐庚,徐政,薛英林,等. 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电控制系统设计[J]. 高电压技术,2013,39(11):2773-2782.
- [10] 段程亭,宋平岗,李云丰,等. MMC的无锁相环直接功率控制仿真[J]. 华东交通大学学报,2014,31(5):69-76.
- [11] 宋平岗,罗善江,杨姚,等. MMC变流器新型滑模控制器设计[J]. 华东交通大学学报,2015,32(4):85-89.
- [12] 朱瑞可,王渝红,李兴源,等. VSC-MTDC系统直流电压自适应斜率控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(4):63-68.
- [13] 任敬国,李可军,张春辉,等. 基于直流电压—有功功率特性的VSC-MTDC协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):8-15.
- [14] 熊凌飞,韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术,2015,39(6):1586-1592.

Research on Coordinated Control Strategy of DC Voltage in MTDC

Wu Jizhen, Song Pinggang, Luo Jian

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: DC voltage stability is the most important issue of multi-terminal direct current(MTDC), which demands coordinated control of each converter station to maintain the stability of the DC power grid in operation. At present the DC voltage coordination control strategy consist of two kinds of control strategy with communication and non-communication. This paper, firstly discussed the system coordinated control strategy of MMC-MTDC based on the basic operation principle of modular multilevel converter(MMC), and then it focused on research and design of the three non-communication controller. Finally, a five terminal MMC-MTDC simulation model was built to verify and conduct comparison between the different dc-voltage coordinated controllers.

Key words: multi-terminal direct current(MTDC); modular multilevel converter(MMC); DC voltage; coordinated control; non-communication control strategy

(责任编辑 刘棉玲)