

受端多落点级联型混合直流输电系统协调控制策略

曾蕊¹,李保宏¹,刘天琪¹,闫鹤鸣²,米志伟²

(1. 四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065;2. 全球能源互联网研究院有限公司,北京 102209)

摘要:针对受端多落点级联型混合直流输电系统发生交直流故障时,电流分配不平衡导致的功率反送、系统稳定性降低等问题开展研究,并提出改善系统稳定性的协调控制策略。该策略在发生故障时根据线路传输功率、逆变侧电网换相型换流器(LCC)输出功率以及采用定直流电压控制的模块化多电平换流器(MMC)稳态输出功率,对MMC的有功功率指令值进行调控,避免采用定直流电压控制的MMC由逆变改为整流,防止受端交流侧功率大范围转移现象的发生。同时在故障清除后仍可缓解系统恢复过程波动较大的问题,使系统能够快速平稳地恢复至额定运行状态。基于PSCAD/EMTDC建立仿真模型,仿真结果验证了所提协调控制策略可有效减小电压和功率的波动,系统在交、直流典型故障下均能实现平稳过渡,提升了受端系统的稳定性。

关键词:多落点;级联;直流输电;MMC;控制策略

中图分类号:TM 721.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011011

0 引言

根据我国的经济、地理以及能源分布情况,我国电网具有大容量、远距离的输电特点,高压直流输电以其独特的经济和技术优势,拥有广阔的应用前景^[1-2]。传统的基于电网换相型换流器(LCC)的高压直流输电(LCC-HVDC)系统已发展得较为成熟,被广泛应用于远距离、大容量的架空线输电场合,但由于逆变站存在换相失败等缺点,其发展受到限制^[3-4]。近年来,基于模块化多电平换流器(MMC)的高压直流输电(MMC-HVDC)迅速发展,与LCC-HVDC相比,MMC-HVDC不存在换相失败问题,具有可独立控制有功功率和无功功率、无需交流滤波器以及可向无源系统供电等优点^[5-6]。但MMC-HVDC的额定电压和输送功率低于LCC-HVDC,建设成本较高,且不具有直流故障自清除能力。因此,结合LCC-HVDC和MMC-HVDC的混合直流输电系统成为当前直流输电领域的研究热点^[7-9]。

为抑制换相失败,文献[10]提出整流侧采用LCC、逆变侧采用电压源型换流器(VSC)的混合直流输电系统,该系统可彻底避免逆变侧的换相失败问题,提高输电可靠性,但不具有直流故障穿越能力,而架空输电线的直流接地故障不可避免,从而大幅限制了其发展^[11-12]。为解决该问题,可在逆变侧直流出口处串联单向二极管^[13],但会带来额外的功率损耗,或者在逆变侧采用基于全桥子模块(FBSM)和箝位双子模块(CDSM)型的MMC来抑制直流短路时

的故障电流^[14-15],但需大量的全控型电力电子器件,建设成本较高。文献[16-17]提出了一种整流侧采用LCC、逆变侧采用LCC与VSC串联的混合直流输电拓扑结构,对于逆变侧直流电压较低的换流器组采用VSC。相比于其他混合直流系统,所提拓扑大幅减少了建设成本,具有较好的经济性。LCC具有单相导电性,逆变侧直流故障回路中不存在故障电流,因此级联型混合直流输电系统具有优良的直流故障穿越能力,不存在额外的损耗及成本。同时逆变侧的VSC可稳定受端交流母线电压,降低LCC发生换相失败的概率,即使LCC发生换相失败,系统仍可传输一定的有功功率。因此,级联型混合直流输电系统以其独特的优势可应用于高压大容量架空线路输电场合。

当受端采用LCC和MMC串联时,因受限于功率器件的制造水平,通常需要采用多台MMC并联以匹配LCC的输送容量,并且提高整个系统的输送容量。LCC和MMC并联组的存在使受端具备分散接入交流电网的条件,可形成满足多负荷中心用电需求的多落点形式。在经济发达地区边缘,受端可先由LCC将部分直流电转换成交流电接入当地交流电网,其余直流电经直流电缆深入经济发达地区的各个角落,通过VSC进行电能变换馈入各地区的交流电网^[18]。同时由于MMC的控制十分灵活,各台MMC具有多种组合的控制方式。文献[19]研究了混合级联型直流输电系统的受端接线和控制方式,分析了稳态和故障特性,但并未针对系统的故障响应特性提出协调控制策略。文献[20]提出了混合级联型直流输电系统在直流故障期间及故障清除后的恢复控制策略,缓解了故障期间的过电流现象,但该控制策略仅局限于直流故障。目前针对混合级联型系统在发生不同故障下的协调控制策略研究很少。

收稿日期:2020-05-18;修回日期:2020-09-11

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(多落点级联混合直流输电系统关键技术研究)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(Research on Key Technology of Multi-point Cascaded Hybrid DC Transmission System)

特别地,当MMC采用主从控制时,若发生交直流故障,可能产生电流分配不平衡问题,严重时会导致受端交流侧功率大范围转移的功率反向传输现象。因此,针对在主从控制模式下出现的多种故障,研究混合级联型系统的协调控制策略具有重要意义。

本文针对受端级联型混合直流系统,以整流侧采用LCC、逆变侧采用3台MMC并联后与LCC串联的多落点级联型混合直流输电系统为研究对象。基于LCC和MMC的基本控制策略,当系统发生不同典型故障时,针对采用定直流电压控制的MMC和采用定有功功率控制的MMC由电流分配不平衡而导致的直流侧功率反送、交流侧系统稳定性降低的问题,提出了改善受端多落点级联型混合直流输电系统稳定性的协调控制策略。发生故障时根据线路传输功率、逆变侧LCC输出功率以及采用定直流电压控制的MMC的稳态输出功率,对系统中MMC的有功功率指令值进行调控,避免采用定直流电压控制的MMC由逆变改为整流,防止受端交流侧功率大范围转移现象的发生。同时在故障清除后仍可缓解系统恢复过程波动较大的问题,使系统能够快速平稳地恢复至额定运行状态。该协调控制策略在交流、直流典型故障下均能实现系统的平稳过渡,提升直流受端系统稳定性。最后在PSCAD/EMTDC中搭建多落点级联型混合直流输电模型,对所提协调控制策略的有效性进行了验证。

1 受端多落点级联型混合直流输电系统拓扑及数学模型

1.1 拓扑结构

多落点级联型混合直流输电系统的拓扑结构见图1。图中, U_{dcLCC} 、 U_{dcMMC} 分别为LCC、MMC并联组的直流电压; U_{der} 为整流侧直流电压; B_1 — B_4 为交流母线; AC_1 — AC_4 为受端交流系统。整流站由2组12脉动LCC串联构成,逆变站由1组12脉动LCC和MMC并联组串联构成,MMC并联组由3台半桥型MMC并联构成,形成满足多负荷中心用电需求的多落点形式。本系统受端各交流系统之间的电气距离较远,

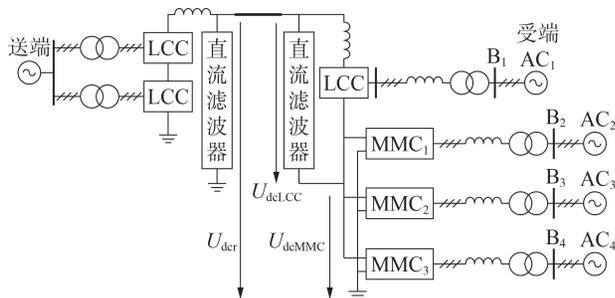


图1 多落点级联型混合直流输电系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of multi-point cascaded hybrid DC transmission system

电气连接较弱。系统主要参数设置见附录中表A1。

1.2 数学模型

混合直流输电系统整流侧由2组12脉动LCC串联构成,其数学模型为:

$$U_{der} = \frac{12\sqrt{2}}{\pi n_1} U_r \cos \alpha - \frac{12}{\pi} X_{rl} I_{dc} \quad (1)$$

$$P_{der} = U_{der} I_{dc} \quad (2)$$

$$Q_{der} = P_{der} \tan \phi \quad (3)$$

$$\cos \phi = [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)]/2 \quad (4)$$

其中, U_r 为整流侧LCC换流变压器阀侧空载线电压有效值; n_1 为整流侧换流变压器变比; α 为整流侧换流器的触发延迟角; X_{rl} 为整流侧换相电抗; I_{dc} 为系统的直流电流; P_{der} 和 Q_{der} 分别为整流侧LCC传输的有功功率和吸收的无功功率; ϕ 为功率因数角; μ 为换相重叠角。

混合直流输电系统逆变侧由LCC与MMC并联组串联构成,如图2所示。图中, U_{sMMC} 为MMC出口处的交流电压; X_r 为变压器漏抗; $U_{AC} \angle \delta$ 为交流母线电压; $Z \angle \theta$ 为交流系统等值阻抗; n_r 为联结变压器变比; $E \angle \delta_c$ 为受端系统等效电动势; P_{LCC} 和 Q_{LCC} 分别为LCC传输的有功功率和无功功率; P_{MMCx} 、 Q_{MMCx} 分别为MMC $_x(x=1,2,3)$ 传输的有功功率和无功功率。

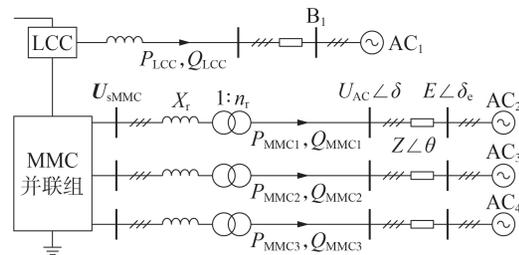


图2 MMC并联组协调控制策略

Fig.2 Coordinated control strategy of MMC parallel group

逆变侧LCC的数学模型参考整流侧LCC的数学模型,不再赘述;3台MMC的数学模型相同。以MMC₁为例,其数学模型为:

$$P_{MMC1} = U_{sMMC} U_{AC} \sin \Delta \delta / (n_r X_r) \quad (5)$$

$$Q_{MMC1} = U_{AC} (U_{sMMC} \cos \Delta \delta - U_{AC}) / (n_r X_r) \quad (6)$$

其中, $\Delta \delta$ 为 U_{sMMC} 与 U_{AC} 的相位差。对于整个逆变侧而言,受端系统向交流系统输出的有功功率 P_{AC} 、无功功率 Q_{AC} 、逆变侧直流线路传输有功功率 P_{dei} 和端口直流电压 U_{dei} 分别为:

$$P_{AC} = [U_{AC}^2 \cos \theta - E U_{AC} \cos(\theta + \delta)]/Z \quad (7)$$

$$Q_{AC} = [U_{AC}^2 \sin \theta - E U_{AC} \sin(\theta + \delta)]/Z \quad (8)$$

$$P_{dei} = P_{LCC} + P_{MMC1} + P_{MMC2} + P_{MMC3} + P_{loss} \quad (9)$$

$$U_{dei} = U_{dcLCC} + U_{dcMMC} \quad (10)$$

其中, P_{loss} 为换流器的总损耗功率。式(1)—(10)为多落点级联型混合直流输电系统的数学模型。

2 受端多落点级联型混合直流输电系统控制策略

与常规直流系统控制方式类似,整流侧的 2 组 LCC 均采用定直流电流控制,并配置最小触发角控制作为后备控制,逆变侧 LCC 采用定直流电压控制,并配置定关断角控制和定直流电流控制作为后备控制。同时,为避免定直流电流控制与定关断角控制之间的频繁切换,在两者之间加入了电流偏差控制(CEC)环节。与之类似,为防止定直流电压控制与定关断角控制方式间的频繁跳变,在二者之间加入了电压偏差控制(VEC)^[18]。LCC 控制系统框图如附录中图 A1 所示。

MMC 采用基于 dq 解耦的直接电流矢量控制方式,该控制方式分为内环电流控制和外环功率/直流电压控制,控制框图如附录中图 A2 所示^[4]。为保证系统直流电压稳定,MMC 并联组中至少有 1 台采用定直流电压控制。MMC 的控制方式如表 1 所示。

表 1 MMC 控制方式

Table 1 Control modes of MMC		
MMC	控制方式	指令值
MMC ₁	定直流电压	380 kV
	定无功功率	0
MMC ₂	定有功功率	-620 MW
	定无功功率	0
MMC ₃	定有功功率	-620 MW
	定无功功率	0

当 MMC 采用表 1 所示控制方式时,级联型混合直流输电系统具有内部分配有功功率的能力,在控制直流电压恒定的同时,拓展了所提拓扑结构的控制功能。

明确整流侧和逆变侧的控制方式后,可得到级联型混合直流输电系统的静态伏安特性图,如附录中图 A3 所示。由于 MMC₁ 采用定直流电压控制策略,MMC₂ 和 MMC₃ 采用定有功功率控制策略,则由 MMC 并联组的伏安特性(黄色实线)可知,逆变侧 MMC 对外呈现定直流电压控制方式(黄色虚线)。由整流侧 LCC 的伏安特性(黑色实线)可知,整流侧 LCC 对外呈现定直流电流控制方式(黑色虚线)。由于逆变侧 MMC 采用定直流电压控制方式,限制了整流侧电压的降低,使其电压稳定于 400 kV。忽略换流器损耗,逆变侧输送的有功功率 P_{dei} 由 LCC 和 MMC 并联组输出功率组成,即:

$$P_{\text{dei}} = P_{\text{LCC}} + P_{\text{MMC1}} + P_{\text{MMC2}} + P_{\text{MMC3}} \quad (11)$$

3 受端多落点级联型混合直流输电系统协调控制策略

结合级联型混合直流输电系统的伏安特性,针对系统可能发生的交流接地故障和直流故障问题进

行理论分析。当整流侧发生交流接地故障时,整流侧 LCC 采用定触发角控制,逆变侧 LCC 采用定直流电流控制或低压限流控制,系统运行点根据逆变侧电流值向左移动,整流侧和逆变侧的传输功率都减小;当逆变侧发生交流接地故障时,逆变侧 LCC 发生换相失败,其控制方式切换为定关断角控制,整流侧 LCC 切换为定直流电流控制或低压限流控制,系统运行点根据整流侧电流值向左移动,系统传输功率减小;当系统发生直流故障时,由于 LCC 的单相导电性,不存在故障电流,且线路直流电压为 0,系统功率传输中断。经上述分析可知,在这几种常见的故障下,线路功率的传输都会减小或者中断。以整流侧发生交流接地故障为例进一步分析。当故障发生时,系统运行于图 A3 所示点 M 。由 MMC 并联组的传输功率表达式 $P_{\text{MMCB}} = P_{\text{MMC1}} + P_{\text{MMC2}} + P_{\text{MMC3}}$ 可知, P_{MMCB} 减小,若采用定有功功率控制的 MMC₂、MMC₃ 的功率指令值保持不变,则 P_{MMC2} 、 P_{MMC3} 保持不变,只能由采用定直流电压控制的 MMC₁ 吸收功率平衡等式,此时 MMC₁ 由逆变改为整流,开始吸收有功功率,与其连接的交流系统出现反向传输功率现象,受端交流系统的稳定性大幅降低。为解决该问题,本文提出了适用于多落点级联型混合直流输电系统中采用定直流电压控制 MMC 和采用定有功功率控制 MMC 的协调控制策略。

根据式(11),可在故障期间及故障清除后恢复期间,设 MMC₂ 和 MMC₃ 的有功指令计算值 P'_{ref} 为:

$$P'_{\text{ref}} = P_{\text{MMC2}} = P_{\text{MMC3}} = 0.5(P_{\text{dei}} - P_{\text{LCC}} - P_{\text{MMC1}}) \quad (12)$$

当计算采用定有功功率控制的 MMC 的 P'_{ref} 时,令 P_{MMC1} 与 MMC₁ 稳态运行时的功率传输值 P_{sMMC1} 相等。 P'_{ref} 相当于只根据 P_{dei} 和 P_{LCC} 的变化进行调整,MMC 并联组的功率变化由采用定有功功率的 MMC 来承担,约束了 P_{MMC1} 的波动,使其可以最大限度地接近稳态运行值,不会出现功率反送现象。因此在故障期间,该协调控制策略可避免换流站的换流方式由逆变改为整流,防止受端系统的交流侧功率出现大范围转移现象,提升受端系统的稳定性,同时在故障清除后,有利于快速平稳地恢复稳态运行。

MMC 协调控制策略如图 3 所示。图中, $P_{\text{ref}}^{\text{N}}$ 为采用协调控制策略后得到的有功功率参考值; P'_{ref} 为根据式(12)由系统实时测量的 P_{dei} 、 P_{LCC} 以及 P_{sMMC1} 得到的计算值。为避免超出换流器容量,设置限幅器的限制区间为 (-1000, 0) MW,同时考虑到 MMC 功率调节极为快速,设置斜率限制器以提高系统的稳定运行。当系统正常运行时,开关的控制信号为 $S_c = 0$,设 MMC₂ 和 MMC₃ 的有功功率指令值为额定值 $P_{\text{ref}} = -620$ MW;当系统发生故障后,经 2 ms 的故障检测时间,切换开关,使 $S_c = 1$,切换为 MMC₂ 和 MMC₃ 的有功功率指令计算值 P'_{ref} 。故障清除后系统

恢复期间仍保持 $S_c=1$,待系统平稳恢复至稳态运行后,再切换至 $S_c=0$ 。由于故障判定不是本文研究重点,仿真中通过故障后的延时环节实现。

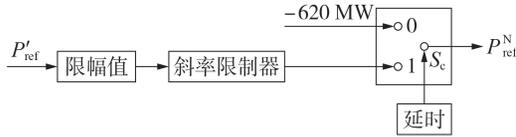


图3 MMC并联组协调控制策略

Fig.3 Coordinated control strategy of MMC parallel group

4 仿真分析

为了验证本文所提协调控制策略的有效性,在PSCAD/EMTDC仿真环境中搭建多落点级联型混合直流输电系统模型,系统具体参数见附录中表A1。

在整流侧和逆变侧分别设置单相接地故障、三相接地故障、单相瞬时性接地故障以及架空线路上极易发生的直流接地故障,对本文所提协调控制策略的改善效果进行研究。下文以单相接地故障和直流接地故障为例进行分析,三相接地故障和单相瞬时性接地故障的仿真结果图见附录中图A4—A7。

4.1 整流侧故障

在整流侧交流母线设置单相接地故障,故障从第4s开始,持续0.5s,系统响应特性如图4所示。图中, u_{AC1} — u_{AC4} 分别为受端交流母线 AC_1 — AC_4 电压。由图4(a)和图4(b)可知,第4s时发生故障,送端交流母线电压跌落,线路直流电压跌落至420kV,由于采用低压限流控制,直流电流减小,线路传输有功功率跌落。逆变侧LCC传输功率减小,采用定直流电压控制的MMC由于送端传输功率减小,两端功率不平衡,导致直流电压降低,产生波动。而采用定有功功率控制的MMC的功率指令值一直保持恒定,为额定值-620MW,其直流电流产生波动,功率缺额需由采用定直流电压控制的MMC传输,因此 MMC_1 由逆变状态切换至整流状态,从交流系统吸收功率,出现反向传输功率现象,造成与 MMC_1 连接的交流系统 AC_2 的母线电压波动较大,降低了受端交流系统的稳定性。

采用本文所提协调控制策略后,系统的响应特性如图4(c)所示。故障发生后经2ms的故障检测时间,采用定有功功率控制的 MMC_2 和 MMC_3 的功率指令值切换为 P^N_{ref} ,输出有功功率迅速减小,并根据系统功率传输变化实时调整,大幅约束了采用定直流电压控制的 MMC_1 的功率波动,使其输出有功功率接近额定值。由图4(c)知, MMC 直流电压波动较小,且有效缓解了 MMC 并联组电流分配不平衡现象,抑制了 MMC_1 直流电流的波动,不会出现功率反送现象。

采用协调控制前、后系统交流电压和有功功率

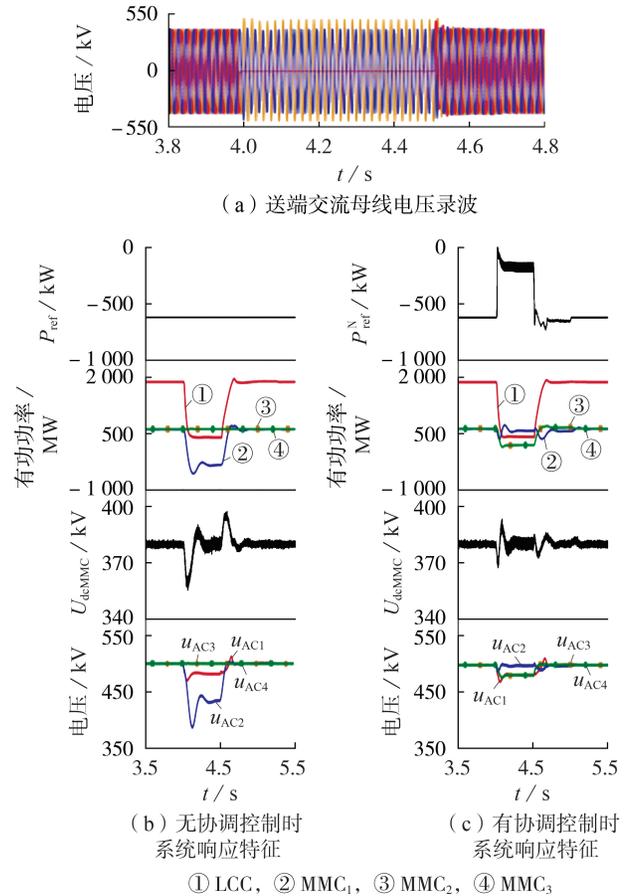


图4 整流侧短路故障下系统响应特性

Fig.4 Response characteristics of system under short circuit fault at rectifier side

波动的对比情况如下: MMC_1 有功功率波动分别为32.3%、180.9%,即采用协调控制后有功功率波动减小了151.6%;与 MMC_1 连接的交流母线电压波动分别为3.2%、22.4%,即采用协调控制后电压波动值减小了19.2%,电压波动大幅减小。虽然 MMC_2 和 MMC_3 所连交流系统的电压和功率有一定波动,但波动范围较小,受端交流系统的稳定性得以提高。故障清除后,系统可以快速平稳地恢复至稳态运行。

4.2 逆变侧故障

在逆变侧交流母线 B_1 处设置单相接地故障,逆变侧LCC发生换相失败,故障从4s开始,持续0.5s,系统响应特性如图5所示。由图5(a)和图5(b)可知,由于逆变侧LCC换相失败,无法传输功率,采用定直流电压控制的 MMC_1 两端有功功率不平衡,直流电压上升,产生较大波动。而采用定有功功率控制的 MMC_2 和 MMC_3 的功率指令值一直保持额定值,为-620MW,其功率缺额需由 MMC_1 输送,因此 MMC_1 需反向传输功率,并且因直流电流不可控而产生反向较大冲击,不利于受端交流系统的稳定。同时因没有较好的故障恢复策略,在故障清除后系统产生了较大波动。

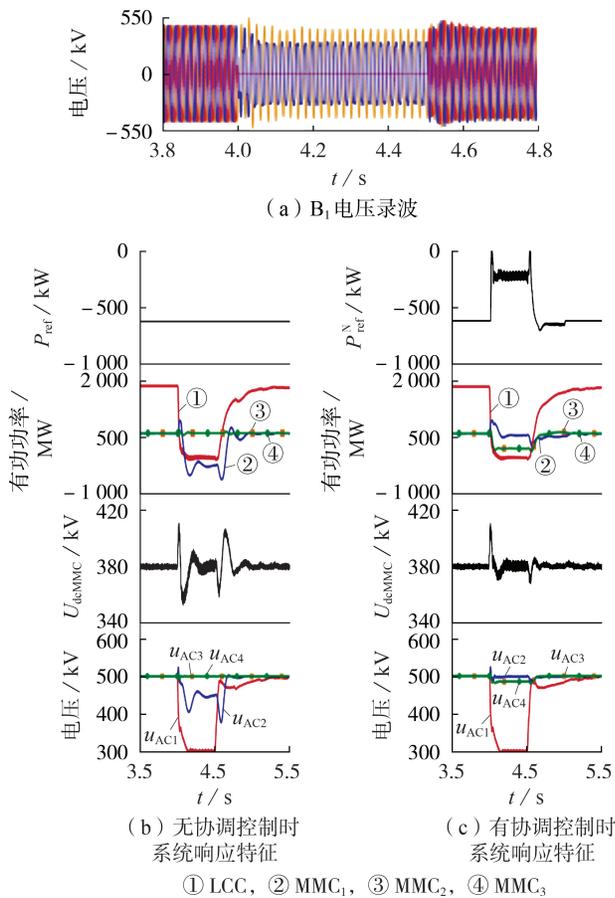


图5 逆变侧短路故障下系统响应特性

Fig.5 Response characteristics of system under short circuit fault at inverter side

采用本文所提协调控制策略后,系统的响应特性如图5(c)所示。故障发生后经2 ms的故障检测时间,采用定有功功率控制的MMC₂和MMC₃的功率指令值切换为 P'_{ref} ,有功指令值迅速减小,并根据系统功率传输变化实时调整。由图5(c)可知,MMC直流电压波动较小,有效地缓解了MMC并联组电流分配不平衡现象,抑制了MMC₁直流电流的波动,并且避免了MMC₁由逆变状态切换为整流状态,不会出现反送功率现象。

采用协调控制前、后系统交流电压和有功功率波动的对比情况如下:MMC₁有功功率波动分别为32.7%、199.1%,即采用协调控制后有功功率波动减小了166.4%;与MMC₁连接的交流母线电压波动分别为3.9%、32.7%,即采用协调控制后电压波动值减小了20.5%,电压波动大幅减小。由上述结果可知,本文所提控制策略提高了受端交流系统的稳定性。在故障清除后,换流器指令协调配合,系统可快速平稳地恢复至稳态运行。

4.3 直流故障

在第4 s时,设置架空线发生直流接地故障,故障持续0.5 s,整流侧LCC延迟触发角移相至150°,故障清除后经0.2 s线路去游离过程,系统开始故障恢

复重启。直流故障下系统的暂态特性如图6所示。由于本系统的逆变侧是由LCC和半桥型MMC构成,可利用LCC的强制移相来清除直流故障,因此具有直流故障穿越能力。由图6(a)可知,故障发生时,直流电压迅速降为0,系统功率传输中断,MMC直流电压降低至303 kV,并持续到故障清除。MMC₂和MMC₃的功率指令值保持额定值,为-620 MW,其功率缺额只能由MMC₁输送,因此MMC₁需由逆变状态切换至整流状态,出现反向传输功率现象,且持续时间较长,降低了受端交流系统的稳定性。

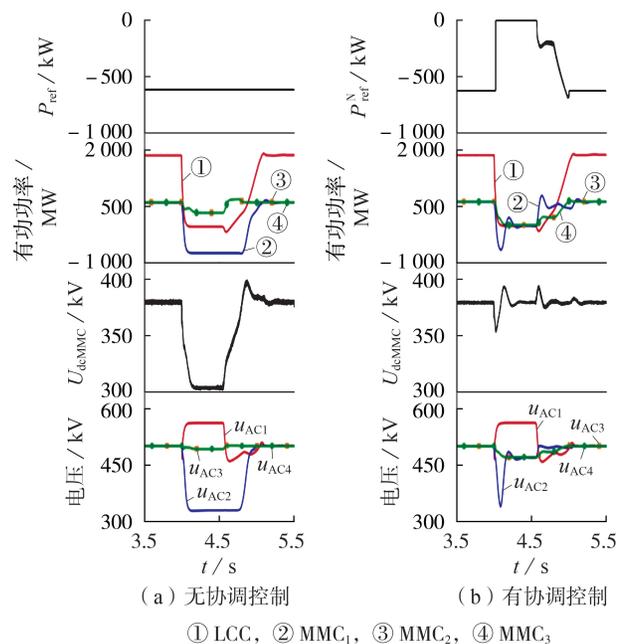


图6 直流故障下系统的暂态特性

Fig.6 Transient characteristics of system under DC fault

采取本文所提的协调控制策略后,系统的暂态特性如图6(b)所示。故障发生后经2 ms的故障检测时间,采用定有功功率控制的MMC₂和MMC₃的有功功率指令值切换为 P'_{ref} ,指令值迅速减小,并根据系统功率传输变化实时进行调整。由图6(b)可知,MMC并联组直流电压波动减少,并迅速恢复至额定值。虽然在协调控制下MMC₁的功率和受端交流系统电压的波动仍然较大,但很快恢复至额定值附近,减小对受端系统的持续影响,MMC₁不会长时间处于整流状态反送功率,提高了系统的稳定性。在故障清除后,换流器指令协调配合,系统可快速平稳地恢复至稳态运行。

5 结论

本文针对受端多落点级联型混合直流输电系统,提出了基于受端主从控制模式的协调控制策略,该策略在发生故障时通过对有功功率指令值进行实时调控,可避免采用定直流电压控制的换流站由逆变改变为整流,防止受端交流侧功率大范围转移现象

的发生。在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建了受端多落点级联型混合直流输电模型,通过仿真分析得到的结论如下:

(1)所提协调控制策略在故障期间可有效地解决MMC并联组电流分配不平衡问题,避免采用定直流电压控制的MMC由逆变改为整流,防止出现受端交流侧功率大范围转移现象,提升了受端系统的稳定性;

(2)所提协调控制策略对于交/直流侧故障均可达到预期效果,实现系统的平稳过渡,增强了系统稳定性;

(3)在故障清除后,所提协调控制策略仍可缓解恢复过程中系统波动较大的问题,使系统能够快速平稳地恢复至额定运行状态。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京:科学出版社,2010:1-9.
- [2] 徐政. 交直流电力系统的动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004:12-13.
- [3] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:1-17.
- [4] 徐政,屠卿瑞,管敏渊. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013:72-77.
- [5] 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 Trillion Q, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-15.
- [6] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 1-9.
- [7] 王曦,李兴源,魏巍,等. 柔性直流和常规直流互联输电系统协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):102-108.
WANG Xi, LI Xingyuan, WEI Wei, et al. Coordinated control strategy for interconnected transmission system of VSC-HVDC and LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 102-108.
- [8] 徐政,王世佳,李宁璨,等. 适用于远距离大容量架空线路的LCC-MMC串联混合型直流输电系统[J]. 电网技术,2016,40(1):55-63.
XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55-63.
- [9] NGUYEN T H, LEE D C, KIM C K. A series-connected topology of a diode rectifier and a voltage-source converter for an HVDC transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1579-1584.
- [10] ZHAO Z, IRAVANI M R. Application of GTO voltage source inverter in a hybrid HVDC link [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 369-377.
- [11] LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [12] LEE Y, CUI S, KIM S, et al. Control of hybrid HVDC transmission system with LCC and FB-MMC [C] // 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, USA: IEEE, 2014: 475-482.
- [13] TANG G, XU Z. A LCC and MMC hybrid HVDC topology with DC line fault clearance capability [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 62: 419-428.
- [14] 许烽,徐政. 基于LCC和FHMMC的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术,2014,40(8):2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [15] 薛英林,徐政. C-MMC直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.
XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [16] QAHRAMAN B, GOLE A. A VSC based series hybrid converter for HVDC transmission [C] // Electrical and Computer Engineering. Saskatoon, Canada: IEEE, 2005: 458-461.
- [17] 郭春义,赵成勇,彭茂兰,等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4345-4352.
GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345-4352.
- [18] 刘杉,余军,贺之渊,等. 基于VSC与LCC混合的多点传输直流输电系统拓扑结构研究与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(10):2980-2988,3148.
LIU Shan, YU Jun, HE Zhiyuan, et al. Research on the topology and characteristic of multi-terminal HVDC based on VSC and LCC [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2980-2988, 3148.
- [19] 徐政,王世佳,张哲任,等. LCC-MMC混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设,2018,39(7):115-122.
XU Zheng, WANG Shijia, ZHANG Zheren, et al. Inverter station connection modes and control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC systems [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 115-122.
- [20] 杨硕,郑安然,彭意,等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):166-172,179.
YANG Shuo, ZHENG Anran, PENG Yi, et al. DC fault characteristic analysis and recovery control strategy for hybrid cascaded HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 166-172, 179.

作者简介:



曾 蕊

曾 蕊(1997—),女,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为混合直流输电(E-mail: scu_zr@163.com);

李保宏(1986—),男,四川平昌人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(E-mail: scu_lbh@163.com);

刘天琪(1962—),女,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(E-mail: tqliu@sohu.com)。

(编辑 王欣竹)

Coordinated control strategy of receiving-end multi-point cascaded hybrid DC transmission system

ZENG Rui¹, LI Baohong¹, LIU Tianqi¹, YAN Heming², MI Zhiwei²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: When AC/DC fault occurs in receiving-end multi-point cascaded hybrid DC transmission system, the problems such as power reverse, system stability reduction caused by unbalanced current distribution are studied, a coordinated control strategy is proposed to improve the system stability. According to the line transmission power, the output power of LCC (Line Commutated Converter) at the inverter side and the steady-state output power of MMC (Modular Multilevel Converter) adopted the control of constant DC voltage, the active power command value is regulated to avoid the commutation mode of MMC adopted the control of constant DC voltage changing from inverter to rectifier, in case of the occurrence of the large-scale power transfer at the receiving-end AC side. At the same time, after the fault is cleared, the large-scale fluctuation problem in the system recovery process can be alleviated, and the system can quickly and smoothly recover to the rated operation state. The simulation model is built based on PSCAD/EMTDC, the simulation results show that the proposed coordinated control strategy can decrease the voltage and power fluctuation, the system can realize smooth transition under typical AC and DC faults, and the stability of the receiving-end system is improved.

Key words: multi-point; cascaded; DC transmission; MMC; control strategy

(上接第103页 continued from page 103)

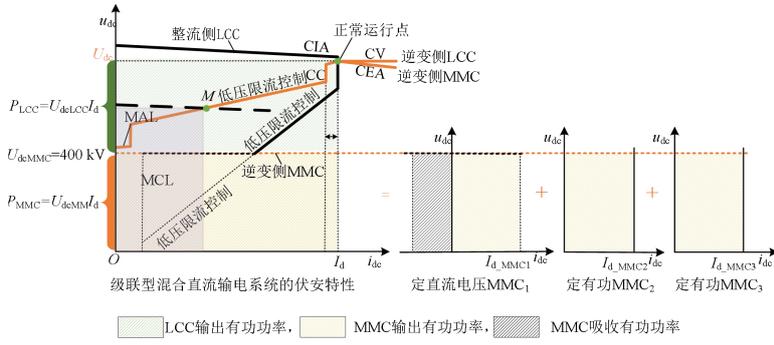
Fault ride through scheme of MMC-UPFC based on hybrid Chopper circuit

ZHENG Tao, WANG Yunpeng, LI Houyuan, LÜ Wenxuan, ZHANG Chengqi, MA Jiaxuan

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The MMC-UPFC (Modular Multi-level Converter based Unified Power Flow Controller) will suffer fault impact in both series side and shunt side when a short circuit occurs in its AC system, leading to over-current blocking of MMCs in both sides and the risk of MMC-UPFC out of service. Taking three-phase short circuit fault as an example, the fault characteristics of MMCs on both series and shunt sides are analyzed. On this basis, a fault ride through scheme of MMC-UPFC based on hybrid Chopper circuit is proposed with referring to Chopper circuit in wind farm AC fault ride through, as well as combining with the effects of different MMC-UPFC operation modes on fault characteristics. The proposed scheme can isolate the connection between the shunt side MMC and the series side MMC after fault occurs, so as to suppress the fault current fed from the series side into shunt side MMC. Simulation results show that the proposed scheme can avoid the blocking of shunt side MMC under different MMC-UPFC operation modes, and the MMC-UPFC can serve as static synchronous compensator and provide reactive power to AC system.

Key words: UPFC; MMC; electric converters; three-phase short circuit in AC system; fault ride through; hybrid Chopper circuit



注：CIA 为定触发角控制；CV 为定电压控制；CEA 为定熄弧角控制；MAL 为最小触发角控制；MCL 为最小电流控制； I_a 为系统总直流电流； I_{a_MMC1} — I_{a_MMC3} 分别为 MMC1—MMC3 的直流电流。

图 A3 级联型混合直流输电系统的伏安特性

Fig.A3 Volt-ampere characteristic of cascaded hybrid DC transmission system

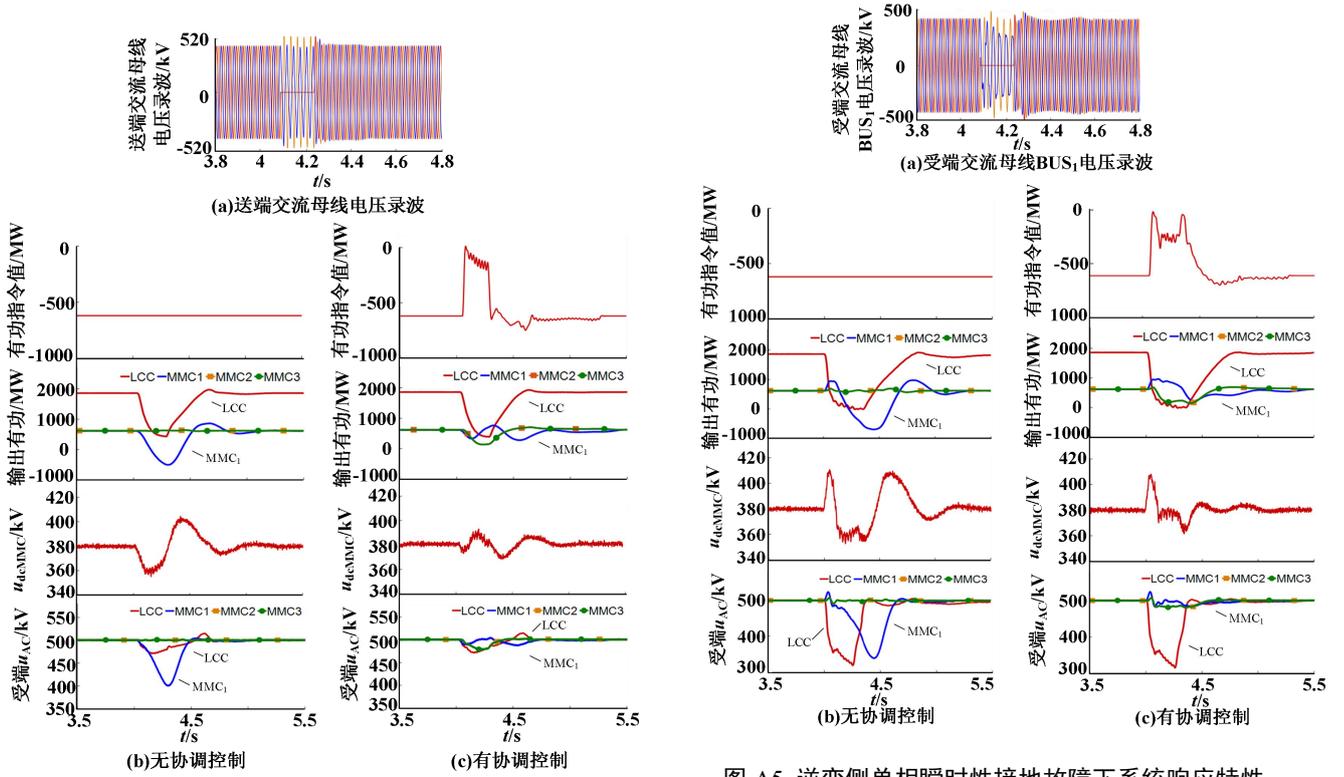
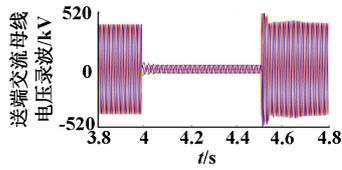


图 A4 整流侧单相瞬时性接地故障下系统响应特性
Fig.A4 Response to AC fault at rectifier side

图 A5 逆变侧单相瞬时性接地故障下系统响应特性
Fig.A5 Response to AC fault at inverter side



(a)送端交流母线电压录波

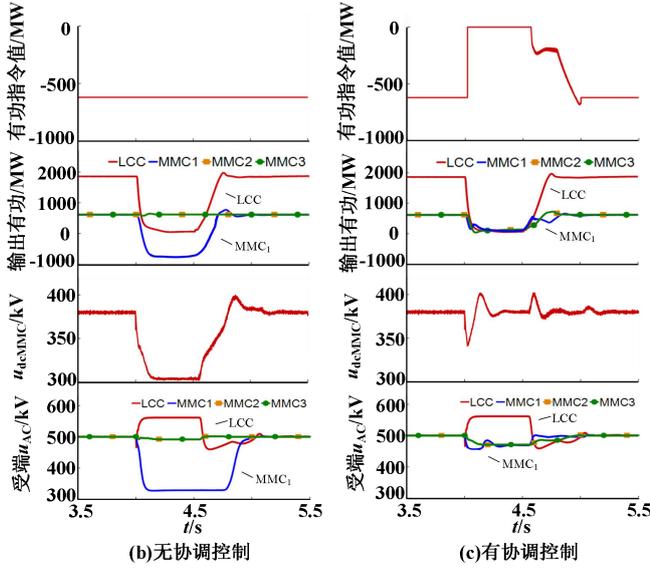
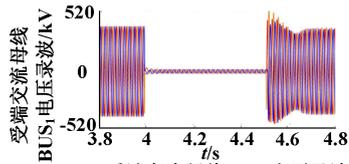


图 A6 整流侧三相接地短路故障下系统响应特性

Fig.A6 Response to AC fault at rectifier side



(a)受端交流母线BUS₁电压录波

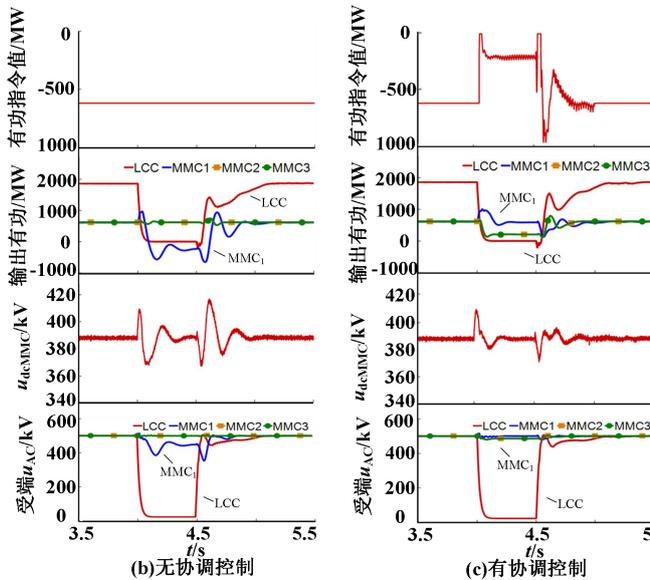


图 A7 逆变侧三相接地短路故障下系统响应特性

Fig.A7 Response to AC fault at inverter side