

MMC-HVDC 输电网用高压 DC/DC 变换器隔离需求探讨

王新颖^{1,2}, 汤广福², 魏晓光², 庞 辉²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206;

2. 大功率电力电子北京重点实验室(全球能源互联网研究院), 北京市 102211)

摘要: 高压 DC/DC 变换器是构建直流电网的关键装备之一,其技术需求分析是其电气拓扑设计和系统应用研究的前提。文中着重围绕基于模块化多电平换流器的高压直流(MMC-HVDC)输电网用高压 DC/DC 变换器电气隔离功能的选择和故障隔离要求等问题展开探讨。从 DC/DC 变换器故障特性、系统绝缘造价和可靠性角度分析了不同接地方式的直流系统中 DC/DC 变换器的电气隔离需求,分析结果表明:对称单极系统中 DC/DC 变换器宜具备电气隔离功能,而双极系统宜采用非电气隔离拓扑。此外,从 DC/DC 变换器外部故障和内部故障两个角度对 DC/DC 变换器的故障隔离需求进行了研究。最后,通过仿真验证了隔离需求分析的正确性。

关键词: 直流电网; DC/DC 变换器; 技术需求; 故障隔离; 电气隔离

0 引言

由于全球气候变化加剧和传统能源日渐枯竭,电力领域日益向着能源多样化、环境清洁化和运行智能化转变^[1]。随着大量光伏、风电等新能源的不断接入,由于其具有间歇性和随机性等特点,对交流电网的安全稳定运行产生了深远影响。柔性直流输电及直流电网技术具备控制灵活、弱电网供电和占地面积小等特点,可为大规模新能源接入、大型城市供电、高渗透率多能互补型配电网供电等电力难题提供有效的技术方案,在电力系统的输配电等领域具有应用前景^[2-4]。类似于交流电网中的交流变压器,DC/DC 变换器起到直联作用,是构建未来多电压等级、多端直流电网的重要组成部分^[5-6]。

电气拓扑设计是直流电网用 DC/DC 变换器的关键技术之一。目前所提基于模块化多电平换流器的高压直流(MMC-HVDC)输电网用高压 DC/DC 变换器拓扑,可根据是否采用交流中频变压器而具备电气隔离功能,分为电气隔离型 DC/DC 变换器和非电气隔离型 DC/DC 变换器。文献[7-8]提出了隔离型模块化多电平 DC/DC 变换器(modular multilevel DC/DC converter, M2DC)。该拓扑采用中频变压器连接输入和输出侧模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC),可提供电气

隔离,具有良好的故障特性。但所需子模块数庞大,成本较高,装置容量利用率低^[9]。文献[10-11]研究了两种非隔离型两级变换式 M2DC,分别采用电感和 LCL 电路连接输入和输出侧 MMC。该变换器可避免隔离型 M2DC 中由中频变压器产生的高损耗。文献[12-13]提出两种非隔离型直接变换式 DC/DC 变换器,分别研究了自耦型和分压式 M2DC。此类变换器的优点在于高、低压侧共用一部分子模块,可减小子模块数量。上述文献表明:MMC-HVDC 输电网用 DC/DC 变换器拓扑设计具有多样性,拓扑是否需要电气隔离功能应根据具体的应用场合进行合理选择。

不同应用场合对 DC/DC 变换器的技术要求不同,进而导致 DC/DC 变换器采用的技术路线不同,并直接影响装置体积、系统成本和可靠性等。故明确直流电网用 DC/DC 变换器的技术要求尤为重要。文献[10]对直流电网用 DC/DC 变换器的容量、电压变比进行了初步界定,表明直流输电网用 DC/DC 变换器容量属百兆瓦级,额定电压为百千伏级,且电压变比属中小电压变比;文献[14]指出直流输电网用 DC/DC 变换器应具备能量双向流动功能,且应用于对称单极直流系统的 DC/DC 变换器需要具备电气隔离功能;文献[15-16]从装备安全性的角度指出了直流互联用 DC/DC 变换器需具备一定的故障电流耐受能力和故障隔离能力。但是 MMC-HVDC 输电网用高压 DC/DC 变换器是否必

须具备电气隔离功能,何种场合可以采用非电气隔离 DC/DC 变换器以及 MMC-HVDC 输电网用 DC/DC 变换器故障隔离的具体要求等问题需要进一步深入研究。本文着重对上述问题进行探讨。

1 MMC-HVDC 输电网用 DC/DC 变换器电气隔离需求

针对 DC/DC 变换器所连接的不同接地方式的直流网络,分析 DC/DC 变换器采用电气隔离与非电气隔离拓扑下的直流故障影响,以直流系统绝缘造价、装置可靠性和成本为评价标准,研究直流系统中宜采用电气隔离的场合和宜采用非电气隔离的场合。文中电气隔离型、非电气隔离型两级变换式和分压型 M2DC 为例进行分析,所用拓扑如附录 A 图 A1 所示。

1.1 对称单极系统间的互联

考虑高压大功率应用场合下,MMC 在硬件和软件方面较两电平电压源换流器(VSC)具有优势,文中仅以 MMC-HVDC 对称单极系统进行讨论。MMC-HVDC 对称单极系统的故障特点在于:因系统采用换流变压器阀侧经电抗星形接地方式,当系统直流侧发生单极接地故障时,不会产生较大的故障电流,非故障极对地电压变为额定值的两倍^[17]。

1)假设 DC/DC 变换器采用非隔离型两级变换式拓扑和中性点不接地的非隔离型直接变换式拓扑,分别如图 1(a)和(b)所示,其中 SM 表示子模块串。当直流高压侧发生单极接地时,由于直流侧不存在放电回路,高压侧非故障线路对地电压变为额定电压的两倍。考虑 DC/DC 变换器的高低压侧具有电气联系,故低压侧线路对地最高电压将接近高压侧系统额定值的两倍。根据安全设计要求,低压系统中的线路及设备均需要按照高压侧的故障电压等级来设计,经济性较差。

2)假设 DC/DC 变换器采用中性点直接接地的非隔离型直接变换式拓扑,如图 1(c)所示。当直流高压侧发生单极接地故障时,故障点与 DC/DC 变换器接地点形成放电回路。非故障线路对地电压逐步升高约额定电压的两倍,进而导致非故障极 DC/DC 变换器(图 1(c)中红色子模块串)将承受约额定电压两倍的故障电压,使得 DC/DC 变换器需要配置更多的子模块以耐受故障电压,亦不合理。

3)若 DC/DC 变换器采用变压器进行电气隔

离,如图 1(d)所示,低压侧不受高压侧单极接地故障的影响,低压系统只需要按照低压侧故障电压等级来设计。此时,高压侧因单极接地故障产生的过电压使得变压器相对地电压升高,在变压器设计时需进行考虑。

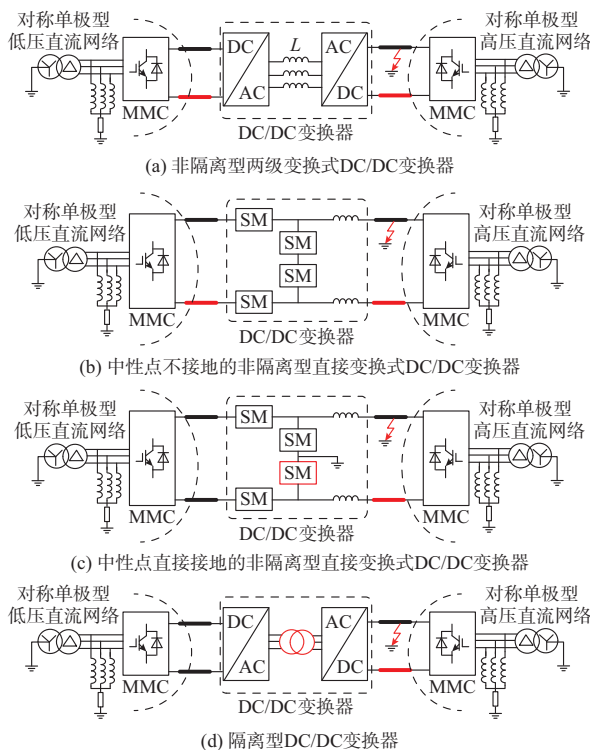


图 1 对称单极系统单极接地故障分析
Fig.1 Analysis of pole-to-ground fault in symmetrical monopole system

综上所述,对于 MMC-HVDC 对称单极系统,当 DC/DC 变换器的变比越大,采用不隔离设计的劣势越明显。从高、低压系统及 DC/DC 变换器装置安全的角度考虑,宜优先选用隔离型 DC/DC 变换器。

1.2 双极系统间的互联

随着柔性直流输电系统传递容量和额定电压等级的持续提升,柔性直流输电双极系统成为趋势。当直流侧发生短路故障时,双极系统中健全极可正常运行,提高供电可靠性^[18]。为了保证双极系统的供电可靠性,DC/DC 变换器宜采用上下对称结构且中性点直接接地,如图 2 所示。当发生单相接地故障时,无论 DC/DC 变换器是否具备电气隔离,非故障极对地电压均不会发生变化;在故障极停止运行后,非故障极可保证继续正常运行。与隔离型 M2DC 相比,非隔离型直接变换式 DC/DC 变换器所需功率器件数量少,具有经济优势。故双极系统

中宜优先考虑非电气隔离型直接变换式 DC/DC 变换器,并采用对称结构且中性点直接接地。

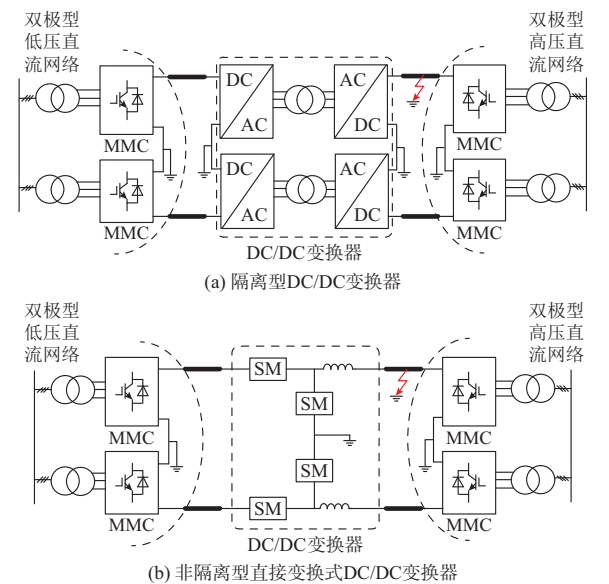


图 2 双极系统中单极接地故障分析
Fig.2 Analysis of pole-to-ground fault in bipolar system

1.3 对称单极系统与双极系统间的互联

对称单极系统与双极系统的故障特性不同,对称单极系统在发生单极接地故障时不存在放电回路,而双极系统中存在放电回路,产生较大的故障电流。当对称单极系统与双极系统互联时,在不影响各自系统特性的前提下,互联用 DC/DC 变换器需要提供电气隔离功能,并提供双极系统所需的直接接地点。图 3 给出了串并混合型 M2DC 电气拓扑,采用两个隔离型 M2DC,在对称单极系统侧两个隔离型 M2DC 并联,在双极系统侧两个隔离型 M2DC 串联,并在中性点直接接地。

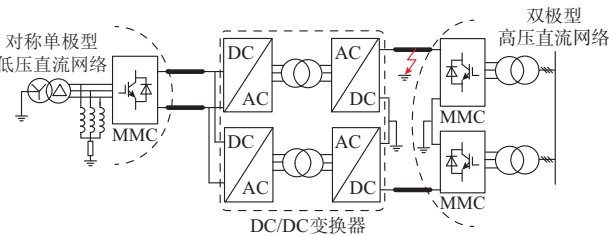


图 3 对称单极与双极系统互联用 DC/DC 变换器
Fig.3 DC/DC converter for interconnecting of symmetrical monopole and bipolar systems

由于隔离变压器的使用,系统高、低压侧具备电气隔离,使得该 DC/DC 变换器拓扑在不影响对称单极系统特性的前提下,能保证双极系统中发生单极故障时非故障极正常运行,确保系统供电的可靠性。

2 MMC-HVDC 输电网用 DC/DC 变换器故障隔离需求

从系统和装置安全的角度来讲,MMC-HVDC 输电网用 DC/DC 变换器无论采用电气隔离型 DC/DC 变换器还是非电气隔离型 DC/DC 变换器都应该具备故障隔离功能。

2.1 系统故障

对于系统故障,DC/DC 变换器故障隔离要求:一是当系统发生短路故障时,需保证 DC/DC 变换器自身的设备安全;二是当系统某一侧发生短路故障时,不影响非故障侧系统的正常运行。

当系统发生短路故障时,为了确保 DC/DC 变换器的安全,需有效限制故障电流的大小,因此 DC/DC 变换器自身需具备阻尼功能。电压源型 DC/DC 变换器通过在系统短路故障回路中输出一个与系统电压源反向的直流电压,以限制故障电流的上升^[19]。例如,基于半桥子模块的隔离型 M2DC,通过同时封锁高、低压侧 MMC 中绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的触发脉冲,可限制高、低压侧的故障电流。分压式 M2DC 通过在内、外桥臂中配置足够的全桥子模块,以具备故障电流限制能力。当高压侧发生短路故障时,封锁所有子模块,使得外桥臂的全桥子模块输出与系统低压侧电压反向的直流电压,以限制故障电流,如图 4(a)所示。当低压侧发生短路故障时,封锁所有子模块,外桥臂中的全桥子模块和半桥子模块共同输出与系统高压侧电压反向的直流电压,达到限制故障电流的目的,如图 4(b)所示。可见,具备阻尼功能的 DC/DC 变换器可以作为系统中高压直流断路器的后备保护设备。

当系统某一侧发生短路故障时,不影响非故障侧系统的继续运行。当系统一侧发生故障时,通过 DC/DC 变换器的阻尼功能将故障电流限制到很低后,可利用隔离开关将高、低压侧断开,从而保证非故障侧系统的继续运行。例如,对于隔离型 M2DC,通过在交流变压器各侧增加隔离开关实现。

2.2 装置内部故障

对于内部故障,要求 DC/DC 变换器内部故障不蔓延到其余系统。非隔离型 DC/DC 变换器,由于高低压直流系统间存在电气联系,故对内部故障保护速度、可靠性等要求更高,以保证系统及装置安全;隔离型 M2DC 中由于变压器主绝缘的存在,高低压侧间不易发生击穿等故障,更容易实现故障隔离要求。

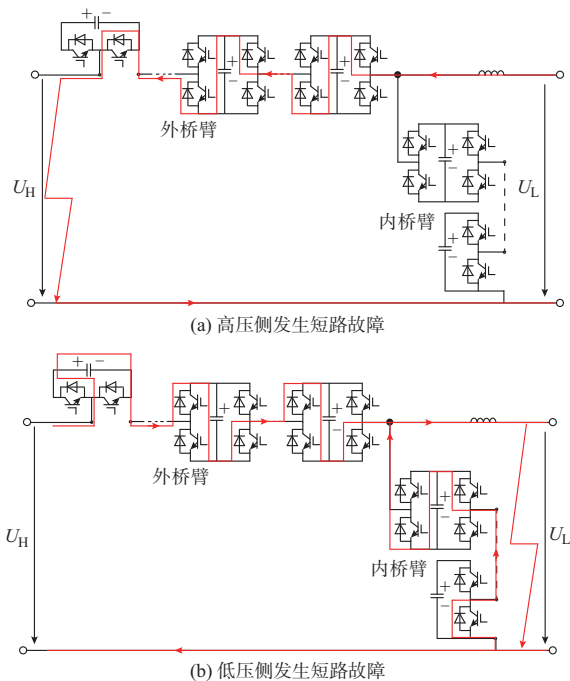


图 4 分压式 M2DC 发生短路故障分析
Fig.4 Fault analysis of divider-type M2DC

以分压式 DC/DC 变换器上桥臂发生整体击穿的极端故障为例说明。如图 5 所示,高压侧电压直接加到低压侧,使得低压侧发生过电压。由于该过电压超过低压侧配置的避雷器参考电压,导致低压侧的避雷器(V_2)迅速动作,可以有效限制低压侧设备承受的电压。与此同时,由于避雷器的泄能电流,导致 DC/DC 变换器高、低压侧“电流平衡”被打破,使得差动保护立刻动作,从而断开 DC/DC 变换器各侧断路器。可见,当 DC/DC 变换器内部发生严重故障时,需借助 DC/DC 变换器外部配置的直流断路器将 DC/DC 变换器从系统中迅速切除。从这个角度来看,直流电网中即使配置具有故障电流限制能力的 DC/DC 变换器,直流断路器不可替代。

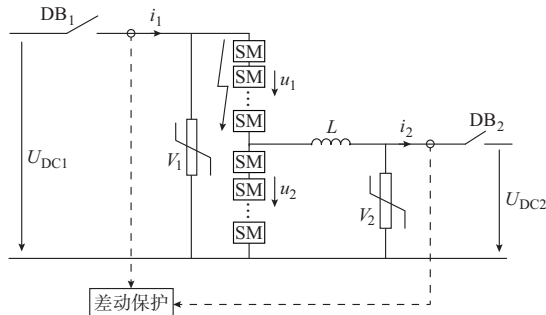


图 5 分压式 M2DC 内部串联桥臂击穿故障
Fig.5 Series arm breakdown fault
in divider-type M2DC

3 仿真实证

在 MATLAB/Simulink 中分别搭建了如图 1、图 2 和图 3 所示的对称单极、双极以及混合直流系统。通过开展各系统故障分析,以验证本文关于 MMC-HVDC 输电网用 DC/DC 变换器的隔离需求分析。仿真中各系统电压额定电压均为 ± 320 kV/150 kV,系统高、低压侧 MMC 采用文献[18]中基于受控电流源的 MMC 机电暂态模型进行仿真,高压侧 MMC 换流站采用定直流电压控制,低压侧 MMC 换流站采用定功率控制,额定输出有功功率为 500 MW。

3.1 对称单极系统单极接地故障

针对 ± 320 kV/150 kV 对称单极 MMC-HVDC 系统,开展高压侧单极接地故障仿真,研究该故障对 DC/DC 变换器和低压系统的影响。仿真中所用 DC/DC 变换器分别采用中性点不接地的分压式 M2DC、中性点接地的分压式 M2DC 以及隔离型 M2DC。其中,分压式 M2DC 和隔离型 M2DC 的参数如附录 A 表 A1 所示,分别采用文献[19-20]中的控制策略。

采用中性点不接地的分压式 M2DC 搭建如图 1(b)所示的仿真系统。当 $t=0.5$ s 时刻高压侧发生单极接地故障,附录 A 图 A2(a)为高压侧故障极和非故障极对地电压($u_{f,H}$ 和 $u_{nf,H}$)波形,图 A2(b)为低压侧故障极和非故障极对地电压($u_{f,L}$ 和 $u_{nf,L}$)波形,图 A2(c)为高、低压侧系统电流(i_H 和 i_L)波形。由图 A2(c)可知:当高压侧发生单极接地故障时,由于系统不存在放电回路,故无故障电流产生。由图 A2(a)可知:高压侧故障线路对地电压变为零,非故障极对地电压升高为额定电压的两倍;由于 DC/DC 变换器不具备电气隔离功能,低压侧非故障极受高压侧非故障极影响,使得对地电压升高较大,如图 A2(b)所示。这种故障电压将严重影响低压侧系统的运行安全。

采用中性点直接接地的分压式 M2DC 搭建如图 1(c)所示的仿真系统。当 $t=0.5$ s 时刻高压侧发生单极接地故障,附录 A 图 A3(a)为高压侧故障极和非故障极对地电压($u_{f,H}$ 和 $u_{nf,H}$)波形,图 A3(b)为低压侧故障极和非故障极对地电压($u_{f,L}$ 和 $u_{nf,L}$)波形,图 A3(c)为非故障极 DC/DC 变换器中子模块电容电压(u_{cap})波形。由附录 A 图 A3(a)和(b)可知,高压侧非故障极对地电压经过一段振荡后逐步稳定为额定电压的两倍,低压侧故障极对地电压变为零附近,非故障极对地电压升高约为额定电压

的两倍,进而导致非故障极 DC/DC 变换器承受的故障电压接近额定电压的两倍。同时,非故障极 DC/DC 变换器中子模块电容电压升高约为额定值的两倍,如附录 A 图 A3(c)所示,将影响 DC/DC 变换器装置安全。

采用隔离型 M2DC 搭建如图 1(d)所示的仿真系统。当 $t=0.5\text{ s}$ 时刻高压侧发生单极接地故障,附录 A 图 A4(a)为高压侧正、负极对地电压(u_{p_H} 和 u_{n_L})波形,图 A4(b)为低压侧正、负极对地电压(u_{p_L} 和 u_{n_L})波形,图 A4(c)为变压器高压侧相对地电压(u_{abc_H})波形。由附录 A 图 A4 可知,当高压侧发生单极接地故障时,高压侧非故障极对地电压升高为额定电压的两倍,但低压侧对地电压保持不变,仅中频变压器相对地电压变高。故采用隔离型 M2DC,有利于对称单极 MMC-HVDC 系统的安全运行。

3.2 双极系统单极短路故障

针对±320 kV/150 kV 双极系统,开展单极接地故障仿真,研究单极接地故障对非故障极的影响以及 DC/DC 变换器的故障隔离功能。

采用中性点直接接地的分压式 M2DC 搭建如图 2(b)所示的仿真系统。附录 A 图 A5 为 $t=0.3\text{ s}$ 时高压侧发生单极接地故障的仿真结果,仿真中在故障发生后 2 ms 封锁故障极 DC/DC 变换器触发脉冲。图 A5(a)为故障极高、低压侧电流(i_{f_H} 和 i_{f_L})波形,图 A5(b)为非故障极高、低压侧对地电压(u_{nf_H} 和 u_{nf_L})波形,图 A5(c)为非故障极高、低压侧电流(i_{nf_H} 和 i_{nf_L})波形。附录 A 图 A6 为 $t=0.3\text{ s}$ 时低压侧发生单极接地故障的仿真结果,仿真中在故障发生后 2 ms 封锁故障极 DC/DC 变换器触发脉冲。附录 A 图 A6(a)为故障极高、低压侧电流(i_{f_H} 和 i_{f_L})波形,图 A6(b)为非故障极高、低压侧对地电压(u_{nf_H} 和 u_{nf_L})波形,图 A6(c)为非故障极高、低压侧电流(i_{nf_H} 和 i_{nf_L})波形。由附录 A 图 A5(b)和(c)及图 A6(b)和(c)可知,对于双极系统,采用分压式 DC/DC 变换器且直接接地,当发生单极接地故障时,非故障极高、低压侧对地电压和电流均不受影响,故可保证非故障极的正常运行。由附录 A 图 A5(a)和 A6(a)可知,从故障开始到封锁脉冲之前的 2 ms 内,故障电流迅速上升;封锁故障极 DC/DC 变换器的触发脉冲后,故障电流减小,达到抑制故障极电流的效果。通过该阻尼功能,可保护系统及装置安全,实现故障隔离功能。

3.3 对称单极与双极混合系统故障

针对±320 kV/150 kV 对称单极与双极混合系

统,高压侧为双极系统,低压侧为对称单极系统。采用图 3 中的串并混合型 M2DC,其中一个隔离型 M2DC 采用定直流输出电压控制,另一个隔离型 M2DC 采用定有功功率控制。

附录 A 图 A7 为 $t=0.5\text{ s}$ 时低压侧发生单极接地故障的仿真结果,其中图 A7(a)为低压侧正、负极对地电压(u_{f_p} 和 u_{f_n})波形,图 A7(b)为高压侧正、负极对地电压(u_{nf_p} 和 u_{nf_n})波形,图 A7(c)和(d)为故障极 DC/DC 变换器内部中频变压器高、低压侧对地电压(u_{abc_fH} 和 u_{abc_fL})波形。由附录 A 图 A7(a)可知,故障发生后低压侧故障线路对地电压变为零,非故障线路对地电压变为额定电压的两倍;由图 A7(b)可知,高压侧线路对地电压不受低压侧直流故障的影响;由图 A7(c)和(d)可知,故障极 DC/DC 变换器内部中频变压器高压侧对地电压保持不变,低压侧对地电压升高,在变压器设计时需进行考虑。从仿真结果可知,对于对称单极与双极混合系统,采用文中所提串并混合型 DC/DC 变换器,不会影响对称单极系统的故障特性。考虑到该拓扑采用了两个独立的隔离型 M2DC,可保证双极系统中发生单极故障时,非故障极的正常运行,确保系统供电的可靠性。

4 结论

直流电网用 DC/DC 变换器的技术需求分析是其拓扑设计及应用研究的前提,本文探讨了 DC/DC 变换器的电气隔离和故障隔离要求,有如下结论。

- 1)对于 MMC-HVDC 对称单极系统,当发生单极接地故障时,非故障极对地电压变为额定电压的两倍,考虑高、低压侧电缆及相关设备的绝缘成本及运行安全性,宜采用隔离型 DC/DC 变换器。
- 2)对于双极系统用 DC/DC 变换器,需保证单极短路故障时,健全极继续正常运行,考虑 DC/DC 变换器的经济性,宜优先考虑非隔离型直接变换式 DC/DC 变换器,并采用对称连接且中性点直接接地。
- 3)对于 MMC-HVDC 对称单极系统与双极系统互联用 DC/DC 变换器,宜采用隔离型 DC/DC 变换器。可在不影响对称单极系统特性的前提下,保证双极系统中发生单极故障时,非故障极的正常运行,确保系统供电的可靠性。
- 4)DC/DC 变换器故障隔离的含义包括两个方面:一是当直流系统某一侧发生短路故障时,不影响非故障侧系统的正常运行,并在故障过程保证 DC/

DC 变换器自身的设备安全;二是要求 DC/DC 变换器装置内部的故障不蔓延到直流系统。

5)文中仿真仅从直流线路的故障电流和故障电压两个角度分析了不同 DC/DC 变换器在直流故障下的影响。由于 DC/DC 变换器中功率器件的开关动作时间属于微秒级,从直流故障开始到 DC/DC 变换器完全闭锁这段时间内开关器件的 dv/dt 和 di/dt 应力更为复杂,因此故障期间开关器件的电气应力仍需进一步研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等.中国未来电网的发展模式和关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 韩永霞,何秋萍,赵宇明,等.采用柔性直流技术的智能配电网接入交流电网方式[J].电力系统自动化,2016,40(13):141-146. DOI:10.7500/AEPS20150906019.
HAN Yongxia, HE Qiuping, ZHAO Yuming, et al. Access mode of intelligent distribution network to AC network based on flexible DC technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 141-146. DOI: 10.7500/AEPS20150906019.
- [3] 李程昊,詹鹏,文劲宇,等.适用于大规模风电并网的多端柔性直流输电系统控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(11):1-7. DOI:10.7500/AEPS20140717010.
LI Chenghao, ZHAN Peng, WEN Jinyu, et al. A multi-terminal VSC-HVDC system control strategy for large wind farms integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20140717010.
- [4] 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.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [5] 汤广福,罗湘,魏晓光.多端直流输电与直流电网技术[J].中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [6] 江道灼,郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [7] KENZELMANN S, RUFER A, VASILADIOTIS M, et al. A versatile DC-DC converter for energy collection and distribution using the modular multilevel converter [C]// 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), August 30- September 1, 2011, Birmingham, UK: 10p.
- [8] KENZELMANN S, DUJIC D, CANALES F, et al. Modular DC/DC converter: comparison of modulation methods [C]// 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), September 4-6, 2012, Novi Sad, Republic of Serbia: 7p.
- [9] SCHÖN A, BAKRAN M M. A new HVDC-DC converter with inherent fault clearing capability [C]// 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), September 2-6, 2013, Lille, France: 10p.
- [10] BARKER C D, DAVIDSON C C, TRAINER D R, et al. Requirements of DC-DC converters to facilitate large DC grids [C]// CIGRE, Session 2012, August 26-31, 2012, Paris, France: 10p.
- [11] WANG X, TANG G, WEI X, et al. A quasi zero-current-switching DC/DC modular-multilevel converter (MMC) with LCL circuit for DC grids [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), September 20-24, 2015, Montreal, Canada: 1450-1454.
- [12] 林卫星,文劲宇,程时杰.直流-直流自耦变压器[J].中国电机工程学报,2014,34(36):6515-6522.
LIN Weixing, WEN Jinyu, CHEN Shijie. DC-DC autotransformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6515-6522.
- [13] FERREIRA J A. The multilevel modular DC converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2013, 28(10): 4460-4465.
- [14] 魏晓光,王新颖,高冲,等.用于直流电网的高压大容量 DC/DC 变换器拓扑研究[C]//第五届电能质量及柔性输电技术研讨会,2014年5月1日,广州:218-224.
- [15] 杨晓峰,郑琼林,林智钦,等.用于直流电网的大容量 DC/DC 变换器研究综述[J].电网技术,2016,40(3):670-677.
YANG Xiaofeng, ZHENG T Q, LIN Zhiqin, et al. Survey of high-power DC/DC converter for HVDC grid application[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 670-677.
- [16] 姚良忠,吴婧,王志冰,等.未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [17] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等.模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J].电力系统自动化,2011,35(23):82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [18] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2012: 248-251.
- [19] KISH G J, RANJRAM M, LEHN P W. A modular multilevel DC/DC converter with fault blocking capability for HVDC

interconnects[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(1): 148-162.

[20] 王新颖, 汤广福, 陈宇, 等. 一种模块化多电平 DC/DC 变换器的基频调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1987-1998.

WANG Xinying, TANG Guangfu, CHEN Yu, et al. A fundamental frequency modulation for module multilevel DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1987-1998.

王新颖(1988—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究

方向: 直流电网用高压 DC/DC 变换器。E-mail: 734390267@qq.com

汤广福(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 高压直流输电、柔性直流输电和灵活交流输电技术及应用。

魏晓光(1976—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 高压直流输电、直流电网技术及其核心装备。

(编辑 蔡静雯)

Discussion on Isolation Requirement of High Voltage DC/DC Converter for MMC-HVDC Transmission Systems

WANG Xinying^{1,2}, TANG Guangfu², WEI Xiaoguang², PANG Hui²

- (1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;
- 2. Beijing Key Laboratory of High Power Electronics (Global Energy Interconnection Research Institute), Beijing 102211, China)

Abstract: The DC/DC converter is one of the key devices of DC grid. The technological requirement analysis of the DC/DC converter is the premise of its topology design and application research. The selection of electrical isolation function and the requirement of fault blocking of DC/DC converters for modular multilevel converter based high-voltage direct current (MMC-HVDC) transmission systems are discussed. The electrical isolation requirements of DC/DC converter under different grounding systems are analyzed in terms of fault characteristics, insulation cost and system reliability. The analysis results show that electrical isolation is needed under symmetric monopole system and non-electrical isolation is better for bipolar system. Besides, DC/DC converter fault blocking demand is carefully investigated in terms of external and internal faults of the DC/DC converter. Finally, the analysis of electrical isolation and fault blocking demand of the DC/DC converter are verified through simulations.

Key words: DC grid; DC/DC converter; technical requirements; fault blocking; electrical isolation