

MMC子模块故障下能量再平衡控制与安全运行域分析

杨立敏^{1,2}, 李耀华^{1,2}, 李子欣^{1,2}, 王平¹

(1. 中国科学院电工研究所 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要:模块化多电平换流器(MMC)在柔性直流输电领域得到了广泛的应用。在高压大功率场合, MMC的子模块数量庞大, 子模块故障是一种常见的故障类型。为了提高可靠性, 通常MMC每个桥臂上均设置一定数量的冗余子模块。然而, 当MMC发生不对称子模块故障时, 直流电流中会出现基频波动, 影响MMC的运行性能。针对上、下桥臂同时存在故障子模块的工况, 分析了MMC桥臂间能量平衡的条件。据此, 提出了一种能量再平衡控制策略, 以抑制直流电流中的基频波动。与传统控制策略相比, 在额定冗余运行域内, 所提控制策略无需提高子模块电容电压。分析了采用所提控制策略时MMC的最大安全运行域, 结果表明所提控制策略能扩展MMC的安全运行域, 进一步提高其可靠性。 ± 350 kV/1 000 MW的MMC硬件在环实验结果验证了所提能量再平衡控制策略的有效性以及安全运行域分析的正确性。

关键词:模块化多电平换流器; 子模块故障; 能量再平衡; 安全运行域

中图分类号: TM 46; TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.04.008

0 引言

模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 具有输出波形谐波含量低、效率高、无需直流电容器以及模块化结构等优点, 成为了近年来的研究热点^[1-4]。目前, MMC 已经被广泛地应用于柔性高压直流输电、新能源并网、电机驱动以及电网异步互联等多个领域^[5-9]。

在高压大功率场合, MMC 的子模块 (SM) 数量庞大, 以云南鲁西背靠背异步互联工程中柔性高压直流输电单元广西侧换流器为例^[9], 其总共包含 2 808 个子模块。子模块故障是一种常见的故障类型, 其发生故障后, 目前通常采用的保护策略是闭锁并旁路故障子模块。为了提高换流器的可靠性和改善子模块发生故障时系统的运行性能, MMC 每个桥臂上均设有冗余子模块。冗余子模块可以分为冷备用^[10]和热备用^[11] 2 种。热备用冗余子模块参与系统的正常运行, 能够避免冷备用冗余子模块启动充电时控制较为复杂的缺点, 在工程上得到了广泛的应用。

热备用子模块的切除策略有 2 种^[12]: 对称切除和不对称切除。对称切除是在切除故障子模块的同时, 旁路故障相另一桥臂对称位置的子模块, 降低了换流器的可靠性和冗余子模块的利用率。通常采用不对称切除策略, 只切除故障模块。当 MMC 发生不对称模块故障时, 会在直流电流中引入基频分量, 增

大子模块电容电压波动。文献[13]首先对该现象的机理进行了探讨, 并指出上、下桥臂能量的不平衡是产生上述现象的根本原因。为了消除直流电流中的基频波动, 文献[14]采用桥臂电流基频和 2 倍频环流比例谐振控制器, 修正各桥臂导通模块数, 维持桥臂能量平衡。文献[15]提出一种环流重复控制器, 抑制桥臂电流中的各次谐波成分。文献[16]在旋转坐标系下利用比例积分 (PI) 控制器消除桥臂电流中的共模基频分量。上述 3 种方法均需要增加额外的闭环控制器调节 MMC 上、下桥臂的能量。文献[13, 17]推导了桥臂能量平衡的必要条件, 并分别提出了桥臂能量的平衡控制策略, 文献[13]通过提高故障桥臂子模块的参考电压以平衡桥臂间的能量, 而文献[17]通过提高故障桥臂子模块的参考电压并降低同相对应桥臂子模块的参考电压实现桥臂能量的平衡。然而, 上述能量平衡的必要条件是在假设每相只有一个桥臂发生故障的前提下推导所得的, 而且上述方法会提高子模块参考电压、增加 MMC 损耗。

在实际工程应用中, MMC 上桥臂和下桥臂同时存在故障子模块的工况十分常见。因此, 本文针对上桥臂和下桥臂同时发生子模块故障的工况进行分析, 并推导了桥臂间能量平衡的必要条件; 在此基础上, 提出了一种子模块故障下的能量再平衡控制策略, 抑制直流电流波动。该控制策略在额定冗余运行域内, 即当故障模块数均不超过额定冗余模块数时, 不需要提高子模块电容电压, 不增加子模块平均损耗。此外, 本文对比分析了传统能量平衡控制策略^[13, 17]与所提控制策略的最大安全运行域。其中, 最大安全运行域是指在保证 MMC 正常运行且输出特性良好的前提下, 各相上、下桥臂故障模块数所允

收稿日期: 2017-06-08; 修回日期: 2018-03-02

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2015AA050102)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA-050102)

许的最大取值范围。最后, ± 350 kV/1 000 MW 的 MMC 硬件在环 HIL (Hardware In Loop) 实验验证了本文所提能量再平衡控制策略的有效性和安全运行域分析的正确性。

1 子模块故障下 MMC 运行特性分析

1.1 MMC 基本原理

MMC 电路拓扑结构如图 1 所示,其包含三相六桥臂,每个桥臂由 N 个子模块和桥臂电感 L_0 串联而成。每个子模块中包含 2 只 IGBT (V_{T1}, V_{T2})、2 只反并联二极管 (V_{D1}, V_{D2})、模块电容 C_0 和一个旁路开关。当子模块正常运行时,旁路开关处于断开状态,通过控制 V_{T1} 和 V_{T2} , 输出正电平或零电平;当子模块发生故障时,闭合旁路开关,隔离子模块故障,维持系统正常运行。图 1 中, U_{dc} 、 I_{dc} 分别为 MMC 直流电压和电流; u_x 、 i_x ($x = a, b, c$) 分别为交流侧相电压和电流,其幅值分别为 U_0 和 I_0 ; u_{xu} 和 u_{xl} 分别为上、下桥臂子模块输出总电压; i_{xu} 和 i_{xl} 分别为上、下桥臂电流; U_{smN} 为子模块额定电容电压。

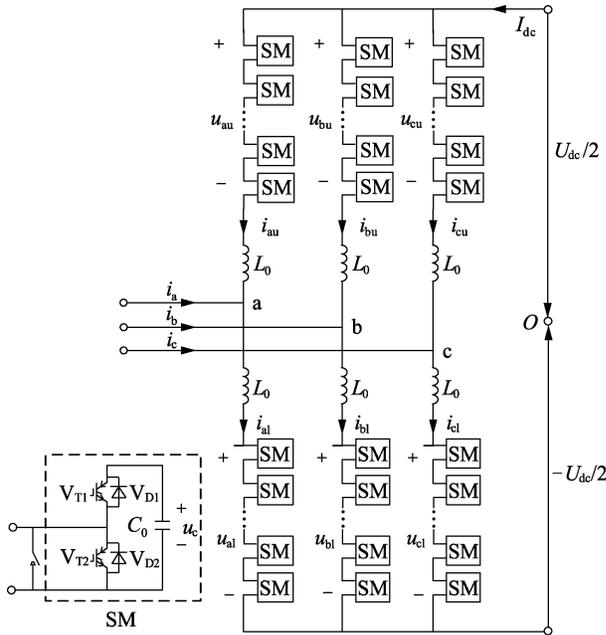


图 1 MMC 电路原理图

Fig.1 Circuit diagram of MMC

以 a 相为例,上、下桥臂分别记为 au 和 al,假设其交流侧相电压和电流为:

$$\begin{cases} u_a = U_0 \sin(\omega t) \\ i_a = I_0 \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

则有:

$$\begin{cases} u_{ref_au} = \frac{1}{2} U_{dc} [1 - m \sin(\omega t)] \\ u_{ref_al} = \frac{1}{2} U_{dc} [1 + m \sin(\omega t)] \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_{au} = \frac{1}{3} I_{dc} - \frac{1}{2} I_0 \sin(\omega t + \varphi) \\ i_{al} = \frac{1}{3} I_{dc} + \frac{1}{2} I_0 \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

其中, u_{ref_au} 和 u_{ref_al} 分别为桥臂 au 和 al 的参考电压; m 为调制比且有 $I_{dc} = -3mI_0 \cos \varphi/4$ 。

1.2 子模块故障下 MMC 运行机理

由于子模块电容电压波动,桥臂 au 和 al 的子模块输出电压为:

$$\begin{cases} u_{au} = N_{open_au} u_{c_au}(t) = \frac{U_{dc}}{2U_{ref_au}} [1 - m \sin(\omega t)] u_{c_au}(t) \\ u_{al} = N_{open_al} u_{c_al}(t) = \frac{U_{dc}}{2U_{ref_al}} [1 + m \sin(\omega t)] u_{c_al}(t) \end{cases} \quad (4)$$

桥臂 au 和 al 所有子模块的电压之和为:

$$\begin{cases} u_{c_au}^\Sigma = N_{normal_au} u_{c_au}(t) \\ u_{c_al}^\Sigma = N_{normal_al} u_{c_al}(t) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $u_{c_au}(t)$ 和 $u_{c_al}(t)$ 分别为桥臂 au 和 al 子模块平均电容电压的瞬时值; N_{open_au} 和 N_{open_al} 为实际导通模块数; U_{ref_au} 和 U_{ref_al} 为模块的实际参考电压; N_{normal_au} 和 N_{normal_al} 分别为上、下桥臂正常模块数。

将式(5)代入式(4),可得:

$$\begin{cases} u_{au} = \frac{U_{dc}}{2N_{normal_au} U_{ref_au}} [1 - m \sin(\omega t)] u_{c_au}^\Sigma \\ u_{al} = \frac{U_{dc}}{2N_{normal_al} U_{ref_al}} [1 + m \sin(\omega t)] u_{c_al}^\Sigma \end{cases} \quad (6)$$

因此,等效开关函数可被定义为:

$$\begin{cases} S_{au} = \frac{U_{dc}}{2N_{normal_au} U_{ref_au}} [1 - m \sin(\omega t)] \\ S_{al} = \frac{U_{dc}}{2N_{normal_al} U_{ref_al}} [1 + m \sin(\omega t)] \end{cases} \quad (7)$$

MMC 中所有子模块的参数几乎完全一致,因此每个桥臂可被视为一个等效电容^[13],且满足:

$$\begin{cases} \frac{C_0}{N_{normal_au}} \frac{du_{c_au}^\Sigma}{dt} = S_{au} i_{au} \\ \frac{C_0}{N_{normal_al}} \frac{du_{c_al}^\Sigma}{dt} = S_{al} i_{al} \end{cases} \quad (8)$$

不考虑桥臂电阻时,根据 KVL 定律可知:

$$U_{dc} = u_{au} + u_{al} + 2L_0 \frac{di_{com}}{dt} \quad (9)$$

其中, i_{com} 为 a 相桥臂电流中的共模分量。桥臂 au 的平均能量 E_{au} 和桥臂 al 的平均能量 E_{al} 可表示为:

$$\begin{cases} E_{au} = C_0 N_{normal_au} U_{ref_au}^2 / 2 \\ E_{al} = C_0 N_{normal_al} U_{ref_al}^2 / 2 \end{cases} \quad (10)$$

将式(3)、(6)~(8)、(10)代入式(9),化简可得:

$$2L_0 \frac{di_{com}}{dt} = -\frac{U_{dc}^2 I_0}{4\omega E_{au} E_{al}} \left\{ (E_{au} - E_{al}) \left[\cos(\omega t + \varphi) - \frac{m \cos \varphi}{2} \cos(\omega t) + \frac{m}{4} \sin(\omega t) \sin(2\omega t + \varphi) \right] - \frac{m(E_{au} + E_{al})}{2} \left[4 \sin(\omega t) \cos(\omega t + \varphi) + \sin(2\omega t + \varphi) - m^2 \cos \varphi \sin(2\omega t) \right] \right\} \quad (11)$$

由式(11)可知,当 $E_{au} = E_{al}$ 时, i_{com} 主要包含2倍频谐波分量,不包含基频和3倍频谐波分量,当MMC正常运行时,2倍频谐波分量通常被消除^[18];当 $E_{au} \neq E_{al}$ 时,在 i_{com} 中将出现基频谐波分量和少量的3倍频谐波分量,并引起直流侧电流波动,影响换流器的性能。

假设MMC每个桥臂的额定冗余模块个数为 N_{IN} ,则总模块个数 $N = U_{dc}/U_{smN} + N_{IN}$ 。记桥臂au和al故障模块数分别为 $N_{f,au}$ 和 $N_{f,al}$,则有 $N_{normal,au} = N - N_{f,au}$, $N_{normal,al} = N - N_{f,al}$ 。因此,由式(10)可得,当桥臂au和al同时存在故障模块时,上、下桥臂能量平衡,即 $E_{au} = E_{al}$ 的条件为:

$$\frac{U_{cref,au}}{U_{cref,al}} = \sqrt{\frac{N_{normal,al}}{N_{normal,au}}} = \sqrt{\frac{N - N_{f,al}}{N - N_{f,au}}} \quad (12)$$

b、c两相可依据式(12)类推。

2 桥臂能量再平衡控制与安全运行域分析

2.1 桥臂能量再平衡控制策略

MMC正常运行时,各桥臂子模块的参考电压均为 U_{smN} 。对于每一相而言,当上桥臂和下桥臂的故障模块数分别为 N_{fU} 和 N_{fL} 时,其桥臂能量的平均值为:

$$\begin{cases} E_U = \frac{1}{2} C_0 (N - N_{fU}) U_{smN}^2 \\ E_L = \frac{1}{2} C_0 (N - N_{fL}) U_{smN}^2 \end{cases} \quad (13)$$

如果 $N_{fU} \neq N_{fL}$,则上桥臂和下桥臂能量不平衡,由1.2节分析可知,此时将引起直流侧电流波动,影响换流器的运行性能。

针对该故障工况,本文提出了一种MMC上、下桥臂能量再平衡控制策略,如图2所示。该方法首先通过检测模块故障状态,确定上桥臂和下桥臂的故障模块数 N_{fU} 、 N_{fL} ;然后,根据1.2节推导得到的上、下桥臂间能量平衡条件,在如图3所示的桥臂能量平衡控制器中,分别计算上、下桥臂子模块参考电压,具体如下。

a. 在额定冗余运行域内,即 $N_{fU} \leq N_{IN}$ 且 $N_{fL} \leq$

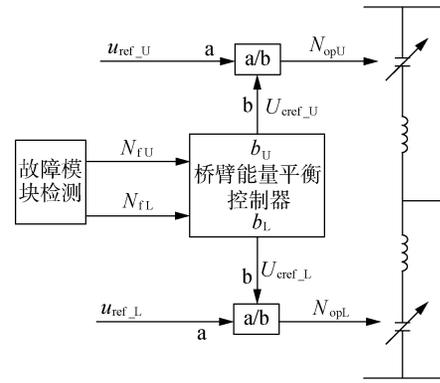


图2 所提桥臂能量再平衡控制策略框图

Fig.2 Block diagram of proposed bridge-arm energy rebalance control strategy

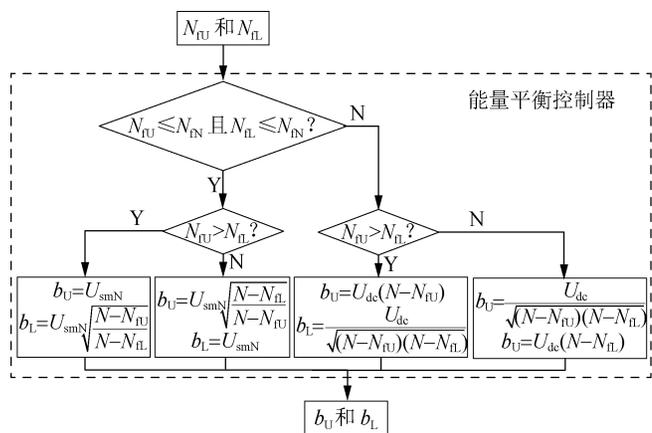


图3 桥臂能量平衡控制器的流程图

Fig.3 Flowchart of bridge-arm energy balance controller

N_{IN} ,如果 $N_{fU} > N_{fL}$,要使上、下桥臂能量平衡以抑制直流电流中的基频波动且不提高子模块电压,则由式(10)、(12)可知上、下桥臂子模块参考电压应满足式(14);如果 $N_{fU} < N_{fL}$,则上、下桥臂子模块参考电压应满足式(15)。

$$\begin{cases} U_{cref,U} = U_{smN} \\ U_{cref,L} = U_{smN} \sqrt{(N - N_{fU}) / (N - N_{fL})} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} U_{cref,U} = U_{smN} \sqrt{(N - N_{fL}) / (N - N_{fU})} \\ U_{cref,L} = U_{smN} \end{cases} \quad (15)$$

b. 在额定冗余运行域外,即 $N_{fU} > N_{IN}$ 或 $N_{fL} > N_{IN}$,如果 $N_{fU} > N_{fL}$,要使上、下桥臂能量平衡,不影响MMC的交流输出特性且最小化子模块电压的增量,则由式(10)、(12)及MMC运行原理可知,上、下桥臂子模块参考电压应满足式(16);如果 $N_{fU} < N_{fL}$,则上、下桥臂子模块参考电压应满足式(17)。

$$\begin{cases} U_{cref,U} = U_{dc} / (N - N_{fU}) \\ U_{cref,L} = U_{dc} / \sqrt{(N - N_{fU}) (N - N_{fL})} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} U_{cref,U} = U_{dc} / \sqrt{(N - N_{fU}) (N - N_{fL})} \\ U_{cref,L} = U_{dc} / (N - N_{fL}) \end{cases} \quad (17)$$

最后,根据上桥臂参考电压 U_{ref_U} 、下桥臂参考电压 U_{ref_L} 计算导通模块数 N_{opU} 和 N_{opL} ,并采用文献 [19] 中所提低开关频率的均压策略生成模块开关信号。采用本文所提能量再平衡控制策略,由式 (14)、(15) 可知,在额定冗余运行域内,故障子模块数较少的桥臂的子模块参考电压会降低,故障子模块数较多的桥臂的子模块参考电压维持为额定值。因此,当子模块发生故障且在额定冗余运行域内时,采用所提控制策略平衡 MMC 上、下桥臂间能量以抑制直流电流中的基频波动,不会使子模块电压升高。

2.2 安全运行域分析

子模块发生故障时 MMC 的最大安全运行域,即 MMC 所能允许的最大故障模块数,是 MMC 运行可靠性的重要指标。子模块发生故障时 MMC 的安全运行域边界条件主要取决于能量再平衡方法以及子模块电容电压参考值的上界 U_{cref_limit} 。该值由所选用 IGBT 模块的耐压特性决定,通常存在 $U_{cref_limit} > U_{smN}$ 。

本文所提的能量再平衡策略记为方法 1,由式 (16)、(17) 可知,MMC 的安全运行域边界为:

$$\begin{cases} N_{fU} = N - \frac{U_{dc}}{U_{cref_limit}} & N_{fU} > N_{fL} > N_{fN} \\ N_{fL} = N - \frac{U_{dc}}{U_{cref_limit}} & N_{fL} > N_{fU} > N_{fN} \end{cases} \quad (18)$$

将传统的控制方法策略即文献 [13] 中所提方法记为方法 2,将文献 [17] 中所提方法记为方法 3,在相同 U_{cref_limit} 的前提下,分析其边界条件。

在方法 2 中,当 N_{fU} 或 N_{fL} 大于额定冗余模块数 N_{fN} 时,如果 $N_{fU} > N_{fL}$,则上桥臂子模块参考电压取为 $[U_{dc}/(N-N_{fU})] \sqrt{(N-N_{fL})/(N-N_{fU})}$,下桥臂子模块参考电压取为 $U_{dc}/(N-N_{fU})$;如果 $N_{fU} < N_{fL}$,则上桥臂子模块的参考电压取为 $U_{dc}/(N-N_{fL})$,下桥臂子模块的参考电压取为 $[U_{dc}/(N-N_{fL})] \times \sqrt{(N-N_{fU})/(N-N_{fL})}$ 。因此,安全运行域边界满足:

$$\begin{cases} (N-N_{fU})^{3/2} = \frac{U_{dc} \sqrt{N-N_{fL}}}{U_{cref_limit}} & N_{fU} > N_{fL} > N_{fN} \\ (N-N_{fL})^{3/2} = \frac{U_{dc} \sqrt{N-N_{fU}}}{U_{cref_limit}} & N_{fL} > N_{fU} > N_{fN} \end{cases} \quad (19)$$

同理,方法 3 的安全运行域边界满足:

$$\begin{cases} \frac{U_{dc}}{N-N_{fU}} \frac{2\sqrt{N-N_{fL}}}{\sqrt{N-N_{fU}} + \sqrt{N-N_{fL}}} = U_{cref_limit} & N_{fU} > N_{fL} > N_{fN} \\ \frac{U_{dc}}{N-N_{fL}} \frac{2\sqrt{N-N_{fU}}}{\sqrt{N-N_{fL}} + \sqrt{N-N_{fU}}} = U_{cref_limit} & N_{fL} > N_{fU} > N_{fN} \end{cases} \quad (20)$$

根据式 (18) — (20) 所述的 3 种能量再平衡方法的安全运行域边界条件,分别以 N_{fU} 为纵轴、以 N_{fL} 横轴,可画出其相应的安全运行域示意图,如图 4 所示,区域 $OABC$ 为系统设计的额定冗余运行域,区域 OD_1EF_1 为方法 1 对应的安全运行域,区域 OD_2EF_2 为方法 2 对应的安全运行域,区域 OD_3EF_3 为方法 3 对应的安全运行域。图中, $N_{fN}^{(1)}$ 、 $N_{fN}^{(2)}$ 、 $N_{fN}^{(3)}$ 分别表示采用方法 1、2、3 且一个桥臂无故障模块时,同相对应桥臂所允许的最大故障模块数。从图 4 中可直观看出,与传统方法 2 和方法 3 相比,本文所提的能量再平衡控制方法 1 具有更大的安全运行域、更高的可靠性。

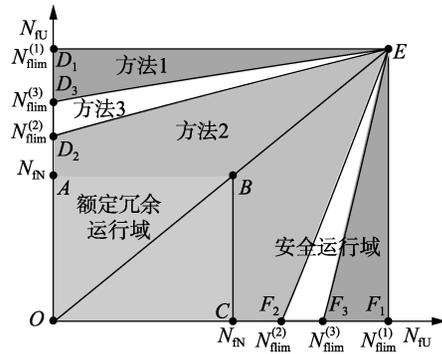


图 4 3 种能量再平衡方法的安全运行域示意图

Fig.4 Safe operation region of three energy rebalance control methods

3 硬件在环实验验证

为了验证所提桥臂能量再平衡控制策略及安全运行域分析的正确性,本文搭建了 ± 350 kV/1 000 MW MMC 的硬件在环实验平台。该平台主要包括 RT-LAB (OP5600) 和 MMC 控制保护系统,二者通过高速光纤交互子模块电压、状态以及开关信号等信息。主电路拓扑如图 5 所示,硬件在环实验参数参考已投运的鲁西背靠背异步互联工程中广西侧 MMC,主要参数如下:额定功率 $P = 1\ 000$ MW,直流电压 $U_{dc} = 700$ kV,交流电压 $U_{LL} = 375$ kV,交流侧等效电感 $L_s = 0.25$ mH,子模块个数 $N = 468$,额定冗余模块数 $N_{fN} = 30$,子模块电容 $C_0 = 12$ mF,桥臂电感 $L_0 = 105$ mH,子模块额定电容电压 $U_{smN} = 1\ 600$ V,附加均压开关模块数 $N_{Ban} = 6$,控制周期 $T_c = 100$ ms。所用 IGBT 模块为英飞凌 FZ1500R33HL3。

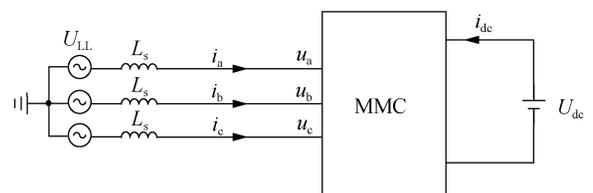


图 5 硬件在环实验主电路拓扑图

Fig.5 Main circuit topology of HIL test

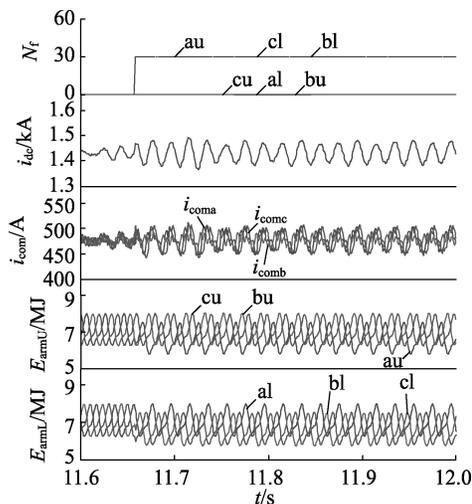


图 9 额定功率逆变运行时故障 1 发生前、后的实验波形

Fig.9 Experimental waveforms before and after Fault 1, operating in rated power as an inverter

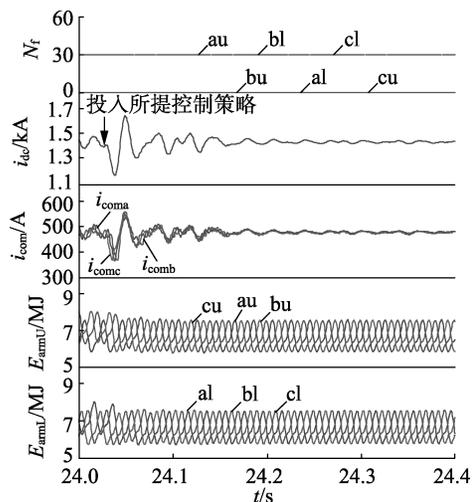


图 10 额定功率逆变运行且发生故障 1 时投入所提控制策略的实验波形

Fig.10 Experimental waveforms of proposed control strategy when Fault 1 occurs, operating in rated power as an inverter

上、下桥臂能量不均衡;MMC 的桥臂电流中出现共模基频分量;直流电流出现基频波动,幅值约为 60 A。投入本文所提再平衡控制策略后,其波形如图 8 所示,由于子模块电压参考值突变,桥臂电流中的共模分量和直流电流中的基频分量呈现振荡衰减,约 0.15 s 后系统恢复稳定。此时,MMC 各相上、下桥臂能量均衡,直流电流中的基频分量被消除。在实际工程应用中,故障模数增加缓慢,子模块电压参考值变化缓慢,故直流电流 i_{dc} 和桥臂电流中的共模分量 i_{com} 不会出现突然剧烈增大。

由图 9 可知,MMC 处于额定功率逆变运行工况且发生故障 1 时,故障桥臂的能量明显降低,三相上、下桥臂能量不均衡;桥臂电流中出现共模基频分量;直流电流中出现基频波动,幅值约为 50 A。投入本文所提再平衡控制策略后,其波形如图 10 所示,

桥臂电流中的共模分量和直流电流中的基频分量呈现振荡衰减,约 0.22 s 后系统恢复稳定。此时,MMC 各相上、下桥臂能量均衡,直流电流中的基频分量被消除。因此,在额定冗余运行域内,所提桥臂能量再平衡控制策略能够有效地平衡桥臂间的能量抑制直流电流中的基频波动。

b. 故障 2。

在故障 2 中桥臂 au、bl 和 cl 故障模块个数为 $N_{f,au} = N_{f,bl} = N_{f,cl} = N_{f,cl}^{(1)} = 56$,桥臂 al、bu 和 cu 无故障模块即 $N_{f,al} = N_{f,bu} = N_{f,cu} = N_{fN} = 30$ 。在初始状态下,投入所提控制策略且 6 个桥臂均有 30 个子模块发生故障并旁路。随后桥臂 au、bl 和 cl 分别新增 26 个故障子模块,使 MMC 运行于故障 2 对应的工况。在新增故障子模块前、后,各桥臂故障模块数 N_f 、直流电流 i_{dc} 以及各相上、下桥臂能量 E_{arm} 的波形分别如图 11—14 所示。

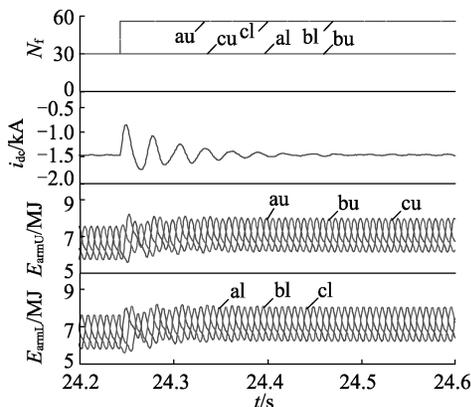


图 11 额定功率整流运行且发生故障 2 时投入所提控制策略的 i_{dc} 与 E_{arm}

Fig.11 i_{dc} and E_{arm} of proposed control strategy when Fault 2 occurs, operating in rated power as a rectifier

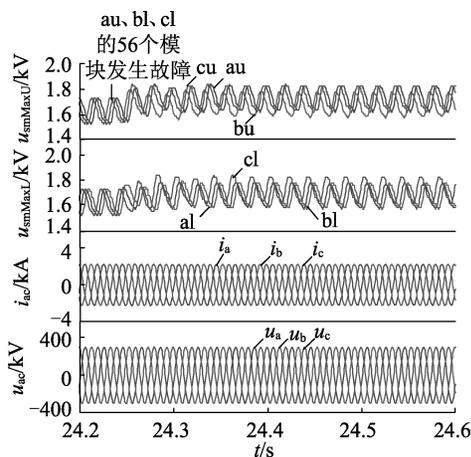


图 12 额定功率整流运行且发生故障 2 时投入所提控制策略的 u_{smax} 、 i_{ac} 和 u_{ac}

Fig.12 u_{smax} , i_{ac} and u_{ac} of proposed control strategy when Fault 2 occurs, operating in rated power as a rectifier

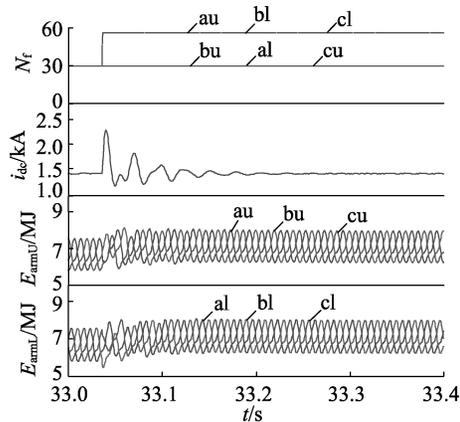


图 13 额定功率逆变运行且发生故障 2 时投入所提控制策略的 i_{dc} 与 E_{arm}

Fig.13 i_{dc} and E_{arm} of proposed control strategy when Fault 2 occurs, operating in rated power as an inverter

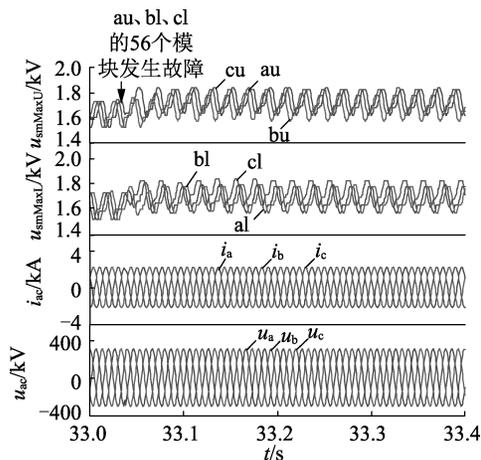


图 14 额定功率逆变运行且发生故障 2 时投入所提控制策略的 u_{smMax} 、 i_{ac} 和 u_{ac}

Fig.14 u_{smMax} , i_{ac} and u_{ac} of proposed control strategy when Fault 2 occurs, operating in rated power as an inverter

MMC 处于额定功率整流和逆变工况,故障 2 发生前、后的实验波形分别如图 11 和图 13 所示。故障前各相上、下桥臂能量均衡,直流电流中无基频分量;故障发生后,直流电流中的基频分量呈现衰减振荡。当 MMC 处于额定功率整流时,系统经过约 0.21 s 后进入稳态,其稳态误差小于 2%;当 MMC 处于额定功率逆变时,系统经过约 0.17 s 后进入稳态,其稳态误差小于 2%。最终 MMC 各相上、下桥臂能量均衡。

从图 12 和图 14 中可以看出,故障 2 发生前、后 MMC 交流侧输出电压和电流保持不变;子模块电容电压最大值增加约 100 V ($U_{ref_limit} - U_{smN} = 100$ V),达到 1 820 V,仍处于所用 IGBT 模块的安全工作电压范围内。该实验结果表明,在额定冗余运行域外最严重的子模块故障工况下,本文所提能量再平衡控制策略能有效地抑制直流电流波动,并保证 MMC 正常运行。因此,第 2 节中安全运行域分析的正确性

得到了验证;采用所提控制策略能扩展传统控制策略的安全运行域,提高 MMC 的可靠性。

4 结论

当 MMC 发生不对称子模块故障时,上、下桥臂间能量失衡,直流电流中出现基频波动。本文针对上、下桥臂同时存在故障子模块的工况,对上述现象的机理进行分析,并推导了 MMC 上、下桥臂间能量平衡的必要条件,如式 (12) 所示。基于该能量平衡条件,提出一种桥臂能量再平衡控制策略以抑制直流电流中的基频波动,并对其安全运行域进行分析。分析结果表明,与传统能量平衡控制方法相比,所提控制策略在额定冗余运行域内不提高子模块电容电压,且具有更大的安全运行域,能进一步提高 MMC 的可靠性。硬件在环实验结果验证了所提控制策略的有效性以及安全运行域分析的正确性。

参考文献:

- [1] PEREZ M A, BERNETS, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):4-17.
- [2] 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, 2014, 30(1):37-53.
- [3] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses, and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8):2633-2642.
- [4] 李超,唐志军,林国栋,等. 模块化多电平换流器子模块均压电阻参数优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10):146-152. LI Chao, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Parameter optimization strategy of sub-module balancing resistor in MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):146-152.
- [5] BERGNA G, BERNE E, EGROT P, et al. An energy-based controller for HVDC modular multilevel converter in decoupled double synchronous reference frame for voltage oscillations reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6):2360-2371.
- [6] VIDAL-ALBALATE R, BELTRAN H, ROLAN A, et al. Analysis of the performance of MMC under fault conditions in HVDC-based offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2):839-847.
- [7] HAGIWARA M, NISHIMURA K, AKAGI H. A medium-voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(7):1786-1799.
- [8] 孙栩,朱晋,刘文龙,等. 一种具有故障隔离能力的 MMC-HVDC 换流站子模块拓扑研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3):120-125. SUN Xu, ZHU Jin, LIU Wenlong, et al. Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3):120-125.
- [9] 许树楷, 罗雨. 背靠背输电系统中柔性直流与常规直流的协调控制策略[J]. 南方能源建设, 2016, 3(2):9-15. XU Shukai, LUO Yu. Study on coordination control strategy of

- VSC/LCC BtB HVDC[J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(2):9-15.
- [10] LI B, ZHANG Y, YANG R, et al. Seamless transition control for modular multilevel converters when inserting a cold-reserve redundant submodule[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8):4052-4057.
- [11] KONSTANTINOU G, POU J, CEBALLOS S, et al. Active redundant sub-module configuration in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4):2333-2341.
- [12] 武文, 吴学智, 荆龙, 等. 模块化多电平变流器子模块故障容错控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1):11-18.
WU Wen, WU Xuezhong, JING Long, et al. A fault-tolerated control strategy for sub-module faults of modular multilevel converters[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):11-18.
- [13] HU P, JIANG D, ZHOU Y, et al. Energy-balancing control strategy for modular multilevel converters under submodule fault conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):5021-5030.
- [14] 李探, 赵成勇. MMC子模块故障下桥臂不对称运行特性分析及故障容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15):3921-3928.
LI Tan, ZHAO Chengyong. Operation characteristics of the MMC with asymmetrical arm under sub-module faults and the fault-tolerant control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15):3921-3928.
- [15] 李凯, 赵争鸣, 袁立强. 模块化多电平变换器上、下桥臂不对称运行环流重复控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20):122-129.
LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang. Repetitive control of circulating current in MMC with asymmetrical operation of upper and lower arms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20):122-129.
- [16] DENG F, TIAN Y, ZHU R, et al. Fault-tolerant approach for modular multilevel converters under submodule faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11):7253-7263.
- [17] ZHAO C, LI Y, LI Z, et al. Characteristics analyses and rebalancing method of modular multilevel converter under submodule fault conditions[C]//IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2016:1-7.
- [18] LI Z, WANG P, CHU Z, et al. An inner current suppressing method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11):4873-4879.
- [19] LI Z, GAO F, XU F, et al. Power module capacitor voltage balancing method for a $\pm 350\text{kV}/1000\text{MW}$ modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6):3977-3984.

作者简介:



杨立敏

杨立敏(1991—),男,山西朔州人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流输电技术以及高压大功率换流器拓扑、控制策略和效率优化(**E-mail**: yanglimin@mail.iee.ac.cn);

李耀华(1966—),男,河南正阳人,研究员,博士研究生导师,主要研究方向为柔性直流输电技术、高速磁悬浮技术和直线电机牵引等(**E-mail**: yhli@mail.iee.ac.cn);

李子欣(1981—),男,河北保定人,研究员,博士研究生导师,主要研究方向为柔性直流输电技术、电力电子变压器、高压大功率换流器等(**E-mail**: lzx@mail.iee.ac.cn);

王平(1955—),男,北京人,教授级高级工程师,主要研究方向为柔性直流输电技术、高速磁悬浮技术、高压大功率换流器等(**E-mail**: wangping@mail.iee.ac.cn)。

Energy rebalance control and safe operation region analysis of MMC with sub-module fault

YANG Limin^{1,2}, LI Yaohua^{1,2}, LI Zixin^{1,2}, WANG Ping¹

(1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: MMC (Modular Multilevel Converter) has been widely applied in the flexible-HVDC power transmission and the sub-module fault is its common fault type due to the huge quantity of sub-modules in the high-voltage and large power MMC. A certain amount of redundant sub-modules are set in each bridge-arm of MMC to improve its reliability. However, when asymmetric sub-module fault occurs in MMC, the fundamental fluctuations will appear in the DC current, influencing the operation performance of MMC. The conditions for energy balance among bridge-arms of MMC are analyzed under the working condition of failure submodules both in upper and lower bridge-arms, on this basis, an energy rebalance control strategy is proposed to suppress the fluctuations in DC current, which, compared with the traditional control strategy, needs not to increase the capacitor voltage of sub-module in the rated redundant operation region. The maximum safe operation region of MMC by using the proposed control strategy is also analyzed, and it is proved to be extended and the reliability of MMC is further improved. Hardware in loop experiment results of $\pm 350\text{ kV}/1\ 000\text{ MW}$ MMC verify the effectiveness of the proposed control strategy and the validity of safe operation region analysis.

Key words: modular multilevel converter; sub-module fault; energy rebalance; safe operation region