

适用于中压配电网的无联结变压器柔性环网控制器

李 峥¹, 陈 武¹, 侯 凯², 史明明³, 牟晓春², 朱劲松⁴

(1. 东南大学先进电能变换技术与装备研究所, 江苏省南京市 210096;

2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏省南京市 211106;

3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103;

4. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省南京市 211100)

摘要: 无联结变压器柔性环网控制器在交流侧出现故障时无法阻止零序电压分量传输, 从而扩大了故障范围。文中采用经典电路分析方法和正负序分析算法, 解释了零序电压分量的形成与传输的基本原理。提出了一种无联结变压器的柔性环网控制器拓扑, 交流侧换流器都采用传统半桥子模块的模块化多电平换流器, 而在正负极性母线上分别串联全桥子模块阀串。利用全桥子模块输出正负电压的能力, 抑制了直流侧电压波动, 同时也阻止了故障范围扩大。通过 MATLAB/Simulink 软件对故障时零序电压被抑制的特性进行了仿真分析, 仿真结果验证了理论分析的正确性和所提拓扑的有效性。

关键词: 中压配电网; 电磁环网; 柔性环网控制器; 模块化多电平换流器; 单相接地故障

0 引言

近年来, 可再生能源发展突飞猛进, 分布式能源接入占比的不断提高给电力系统的稳定性和安全性带来了新的难题^[1-2], 直流驱动负荷更是加剧了配电网的峰谷差, 导致电能质量在不同时段水平参差不齐^[3]。

国内中压配电网普遍采用“闭环设计, 开环运行”^[4-5]的运行模式, 不具备潮流调节、负荷均衡和连续负荷转移的能力^[6-7]。部分配电网存在配电设备陈旧、线路故障率高、配电线路负荷不够均衡, 合环带来短路电流增加、潮流不可控、冲击电流大等问题^[8-9]。柔性环网控制器可以实现供电系统不同分区的合环运行, 实现 AC/DC 变换, 隔离交流故障, 实现有功、无功的快速独立控制, 提高配电网实际使用效率, 实现配电网合环优化运行, 有效应对分布式电源和用户负荷的随机性和波动性问题^[10-11]。

目前研究的柔性环网控制器基本都采用模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC), 通过子模块集合形式进行输出, 避免开关管直接串联, 减小损耗, 降低故障率^[12-14]。柔性直流

输电工程都是通过联结变压器接入到交流系统中, 并通过联结变压器阻断故障零序分量在交直流间的传递^[15-17]。但是考虑到中低压配电网的实际情况, 联结变压器作为仅次于换流阀的造价第二大设备, 其使用会增加柔性环网控制器的占地面积、降低经济性, 有必要省略部分或者全部联结变压器。

交流侧单相接地故障为换流装置常见的故障类型^[18]。采用无联结变压器的换流装置在交流侧出现不对称故障时会带来不利影响。

综上所述, 有必要对柔性环网控制器作进一步研究。文献[19-20]研究适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑, 其方案中换流器通过联结变压器与交流系统相连, 虽然能较好地阻断故障分量的传递, 但变压器占地面积大、造价高。为了减少占地面积, 降低成本, 文献[19]提出了无联结变压器和单联结变压器混合子模块柔性环网控制器两种改进方案, 虽然在一定程度上减少了联结变压器的数量, 但全桥子模块(full-bridge sub-module, FBSM)的数量依然较多。文献[15]提出新的控制方案, 通过设计零序电压抑制控制器, 实现非故障站的稳定对称运行, 但仍采用普通半桥、全桥混合型子模块的换流器, 造价较高。文献[21]提出的方案中换流器均直接与交流侧相连, 一侧换流器采用半桥子模块(half-bridge sub-module, HBSM), 另一侧换流器采用半

收稿日期: 2021-08-06; 修回日期: 2021-12-17。

上网日期: 2022-04-26。

国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(51922028)。

桥、全桥混合型子模块,在文献[20]方案的基础上再节省一组联结变压器,同时对半桥、全桥子模块配比进行优化,经济性有了更大的提升,但将其应用在多端结构中时,该拓扑只有一端可以使用半桥子模块换流器,剩余端口换流器仍需使用半桥、全桥混合型子模块,难以维持经济性。

本文首先分析交流侧不对称故障引起直流侧电压波动以及故障分量传递的内在机理,进而提出了一种无联结变压器的柔性环网控制器拓扑,两侧换流器均直接与交流系统相连,且换流器采用传统半桥子模块。通过将全桥子模块加到正负极性母线上,可以有效隔离2个换流器交流侧故障,并对子模块组成进行优化,减少了全桥子模块数量,同时省去联结变压器,减小柔性环网控制器的占地面积。最后,通过MATLAB/Simulink软件验证所提无联结变压器柔性环网控制器在两端及三端拓扑故障时的有效性。

1 交流侧单相接地故障分析

适用于中压配电网的柔性环网控制器应用场景为在需要开环运行的电网两端采用背靠背柔性直流换流站连接,由此可构成软环网运行,如图1(a)所示。MMC中性点经消弧线圈接地,接线方式为伪双极接线。MMC基础拓扑如图1(b)所示。

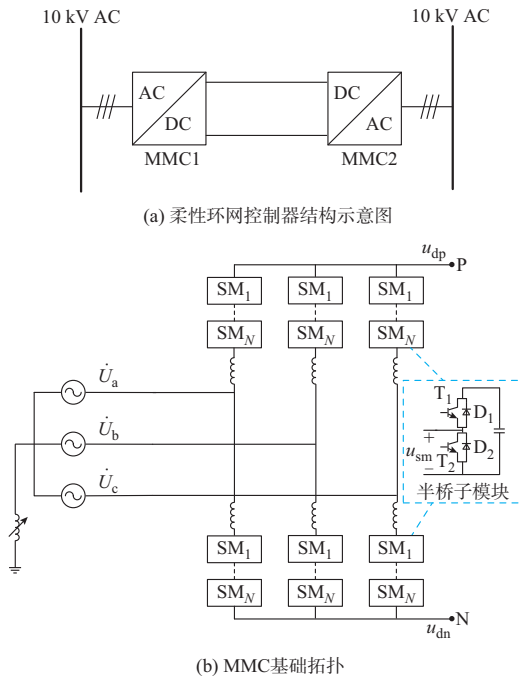


图1 柔性环网控制器结构及其MMC基础拓扑
Fig. 1 Structure of flexible ring network controller and its MMC basic topology

以图1(b)中柔性环网控制器中MMC交流侧c相发生单相接地故障为例进行分析。

设故障前交流侧三相电压为 $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$,其中:

$$\dot{U}_a = U_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中: U_m 为电压峰值; ω 为角频率; φ 为初始角。

故障发生时,c相电压降为零,非故障相电压升高到原来的 $\sqrt{3}$ 倍,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{af} = \sqrt{3} \dot{U}_a e^{-j30^\circ} \\ \dot{U}_{bf} = \sqrt{3} \dot{U}_a e^{-j90^\circ} \\ \dot{U}_{cf} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_{af}, \dot{U}_{bf}, \dot{U}_{cf}$ 为故障后三相电压。

对故障前后三相电压进行正负序分解,如式(3)和式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}^+ \\ \dot{U}^- \\ \dot{U}^{(0)} \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_f^+ \\ \dot{U}_f^- \\ \dot{U}_f^{(0)} \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} \dot{U}_{af} \\ \dot{U}_{bf} \\ \dot{U}_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ 0 \\ \dot{U}_a e^{-j60^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ 0 \\ -\dot{U}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\dot{U}^+, \dot{U}^-, \dot{U}^{(0)}$ 分别为故障前的正序、负序和零序电压分量; $\dot{U}_f^+, \dot{U}_f^-, \dot{U}_f^{(0)}$ 分别为故障后的正序、负序和零序电压分量;

$Z = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$,其中 $a = e^{j120^\circ}$ 。

比较式(3)和式(4)可得,故障前后正序分量保持不变,负序分量一直为零,只有零序分量发生改变。

根据文献[15]的推导结果,同时为方便分析,说明故障电压传导机理,忽略桥臂电抗,可得到如下关系式:

$$\begin{cases} u_{mp} = \frac{u_{dc,ref}}{2} - U_s \\ u_{mn} = \frac{u_{dc,ref}}{2} + U_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{mp} 和 u_{mn} 分别为上、下桥臂稳态时等效桥臂电压; $u_{dc,ref}$ 为直流侧参考电压; U_s ($s=a, b, c$)为交流系统接入网侧S相电压幅值。

c相发生交流单相接地故障后,按照基尔霍夫电压定理,直流侧正极电压等于故障相上桥臂电压,直流侧负极电压等于故障相下桥臂电压负值^[18]。由式(4)与式(5)可得到故障后直流正、负极电压如式(6)所示:

$$\begin{cases} u_{dp} = u_{mp} = \frac{u_{dc,ref}}{2} - U_c = \frac{u_{dc,ref}}{2} + U_f^{(0)} \\ u_{dn} = -u_{mn} = -\frac{u_{dc,ref}}{2} - U_c = -\frac{u_{dc,ref}}{2} + U_f^{(0)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_{dp} 和 u_{dn} 分别为直流侧正、负极电压; $U_f^{(0)}$ 为 $\dot{U}_f^{(0)}$ 的幅值。

由式(6)可知直流侧正负极电压由本身直流电压以及零序分量构成,由此可得,直流侧电压波动的根本原因在于故障零序分量传递扩散。

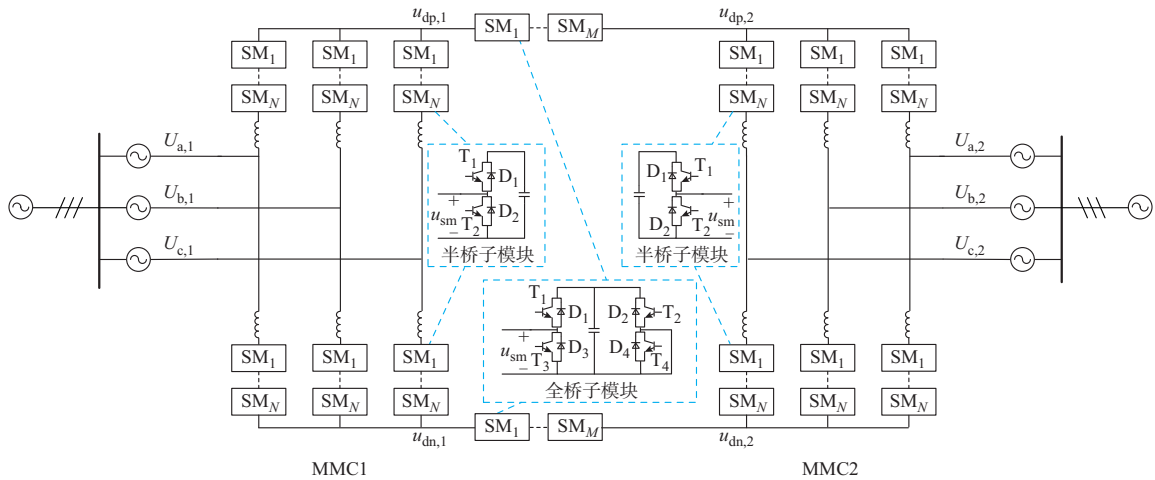


图2 无联结变压器柔性环网控制器两端 MMC 拓扑

Fig. 2 MMC topology at both ends of flexible ring network controller without interface transformer

2.1 零序分量抑制原理

由第1章分析可知,直流侧电压波动在于零序分量未被抑制,使之从交流侧传递到直流侧。

以图2所示拓扑为例,假设MMC1交流侧c相发生单相接地故障,对零序分量不加以抑制,即两端MMC通过直流侧直接连接,故障侧MMC1正、负极对地电压可表示为:

$$\begin{cases} u_{dp,1} = \frac{u_{dc,ref}}{2} - U_{c,1} = \frac{u_{dc,ref}}{2} + U_{f,1}^{(0)} \\ u_{dn,1} = -\frac{u_{dc,ref}}{2} - U_{c,1} = -\frac{u_{dc,ref}}{2} + U_{f,1}^{(0)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_{dp,1}$ 和 $u_{dn,1}$ 分别为MMC1正、负极对地电压; $U_{c,1}$ 为MMC1交流侧c相电压幅值; $U_{f,1}^{(0)}$ 为故障时MMC1交流侧的零序电压分量幅值。

随着非故障侧MMC2子模块开关动作,MMC2直流侧正、负极对地电压分别为:

$$\begin{cases} u_{dp,2} = u_{mp,2} - u_{dp,1} \\ u_{dn,2} = -u_{mn,2} - u_{dn,1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $u_{dp,2}$ 和 $u_{dn,2}$ 分别为MMC2正、负极对地电压; $u_{mp,2}$ 和 $u_{mn,2}$ 分别为MMC2上、下桥臂稳态时的等效

2 无联结变压器的柔性环网控制器

为了阻止故障零序电压由交流侧传递到直流侧,本文提出了一种无联结变压器的柔性环网控制器拓扑,通过改变混联子模块的位置以实现零序分量的抑制。图2给出了无联结变压器柔性环网控制器的两端MMC拓扑示意图,三端MMC拓扑示意图详见附录A图A1,换流器皆直接接入交流系统。换流器的桥臂均由半桥子模块串联组成,直流侧的全桥子模块阀串则由全桥子模块串联而成。

电压。

柔性环网控制器一侧发生故障后,非故障侧交流侧电压等于正极直流电压减去桥臂电压。由式(5)、式(7)和式(8)可得故障发生后,MMC2交流侧c相电压可表示为:

$$U'_{c,2} = U_{f,1}^{(0)} + U_{c,2} \quad (9)$$

式中: $U_{c,2}$ 和 $U'_{c,2}$ 分别为故障发生前、后MMC2交流侧c相电压幅值。

故障电压会由故障端传递到非故障端,扩大故障范围,造成不利影响。MMC3分析同理。

再以图2所示拓扑为例,假设MMC1交流侧c相发生单相接地故障,若对零序分量加以抑制,即两端MMC通过直流侧全桥子模块连接。此时,直流侧出口电压如图3所示。 t_1 时刻故障发生,故障分量传递到MMC1直流侧出口,引起正、负极对地电压波动。此时,全桥子模块开关同步动作,对故障电压进行抑制, t_2 时刻故障结束。由图3可以看出, $t_1 \sim t_2$ 时刻直流侧对地电压保持稳定,故障分量未传递到非故障侧而引起电压波动。

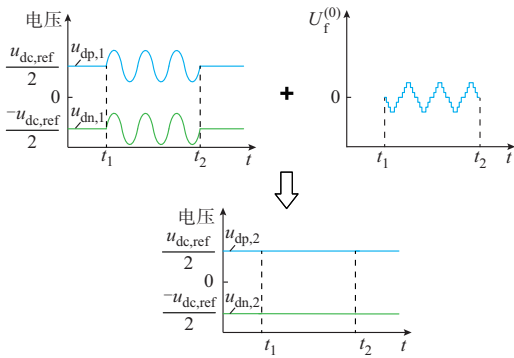


图3 故障电压抑制原理图
Fig. 3 Schematic diagram of fault voltage suppression

因此,本文所提出的柔性环网控制器利用全桥子模块可以输出正负电压的特性,无论哪一端发生交流故障,全桥子模块都能输出与波动电压相反的电位波形进行补偿,维持正负极电压稳定。

2.2 全桥子模块控制策略

由2.1节分析可知,直流侧正负极电压波动由单相故障产生的零序电压引起,因此,可以利用全桥子模块产生与之相匹配的电压,补偿直流侧正负极的电压波动。故障时对交流侧三相电压进行正负序分解,将其中的零序分量 $\dot{U}_f^{(0)}$ 提取出来进行归一化,生成的参考值 U_{ref} 作为调制波加到串联的全桥子模块上,其控制实现如图4所示,全桥子模块采用载波移相调制策略,每个全桥子模块辅以均压环。

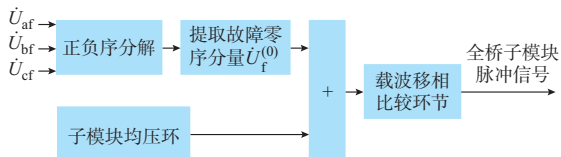


图4 全桥子模块控制框图
Fig. 4 Control block diagram of full-bridge sub-module

2.3 全桥子模块配置

由2.1节分析可知,引起直流侧电压波动的零序分量在幅值上近似等于交流系统输入电压,可根据实际需求进行计算配置。

由式(4)可得:

$$\dot{U}_f^{(0)} = -\dot{U}_c \quad (10)$$

因此,全桥子模块输出波形应与交流侧三相电压幅值近似一致,才可有效抑制零序分量。以图2两端MMC为例,假设全桥子模块参数与换流器半桥子模块参数一致,设其子模块额定电压均为 U_{sm} ,则全桥子模块数量 M 为:

$$M = \frac{U_c}{U_{sm}} \quad (11)$$

而单相每桥臂半桥子模块个数 N 为:

$$N = \frac{U_{dc}}{U_{sm}} \quad (12)$$

式中: U_{dc} 为直流侧正负极间的电压。

设调制比 λ 为:

$$\lambda = 2 \frac{U_s}{U_{dc}} \quad (13)$$

则可以得出半桥子模块个数与全桥子模块个数间的关系为:

$$M = N \frac{\lambda}{2} \quad (14)$$

一般调制比取0.8,则全桥子模块 M 的个数为:

$$M = 0.4N \quad (15)$$

在中性点经消弧线圈接地的系统中,一般单相接地故障所导致的电压波动变化最大。因此,按上述计算方法所得到的全桥子模块个数具有一定合理性。在图2所示拓扑中,以接入10 kV交流配电系统为例,对于半桥型MMC,直流电压为 ± 10 kV,子模块额定电压为0.91 kV,计算可得半桥型MMC中每个桥臂的半桥子模块个数为 $N=22$ 。再根据式(15),则直流侧每极全桥子模块个数为 $M=9$,正负极共18个。

此方案在多端MMC中同样适用,计算方式与上述一致,每一端MMC直流侧出口对应的全桥子模块为:

$$k = 0.2N \quad (16)$$

假设MMC1交流侧发生故障时,此时MMC1直流侧全桥子模块与MMC2直流侧全桥子模块输出电压叠加共同抑制零序分量,维持MMC2直流侧电压稳定;相同的,MMC1直流侧全桥子模块与MMC3直流侧全桥子模块输出电压叠加共同抑制零序分量,维持MMC3直流侧电压稳定。

以附录A图A1所示三端MMC拓扑为例,每桥臂半桥子模块个数为 $N=22$,则根据式(16),直流侧每极全桥子模块个数为 $k=5$,正负极共30个。

3 方案经济性对比

本章主要从子模块个数及换流器损耗等方面对本文所提方案和其他3种方案的经济性进行对比。方案1为传统单变压器复杂结构,方案2与方案3略去变压器,从控制和拓扑结构上进行改进,本文所提出的方案(即方案4)既无变压器又改进拓扑以降低控制难度。各方案拓扑详见附录A图A2,以下对比分析前提条件为两端MMC,额定传输功率为2 MW,直流侧电压为 ± 10 kV,调制比 λ 约为0.8,直

流侧电流 $I_{dc}=100$ A, 满载运行, 交流侧相电流峰值约为 $I_a=80$ A, 桥臂电流为 $I_a/2 + I_{dc}/3$, 其峰值约为 70 A。计算一个工频周期内子模块损耗。参考文献[22]的计算方法以及文献[19]的部分数据, 以换流器总损耗占传输功率百分比作为结果。

方案1采用传统单联结变压器混合子模块结构, 虽然节省了一组联结变压器和一半的全桥子模块, 但造价偏高、设备占地过大, 且尚无混合子模块结构换流器的工程经验可借鉴, 有一定工程实现难度^[19]。该方案的设备组成为1台联结变压器+22×12个半桥子模块+22×6个全桥子模块, 损耗约为1.932%。

方案2给出的是无联结变压器混合子模块柔性环网控制器, 可省去2组联结变压器, 但换流器均采用半桥、全桥1:1混合子模块。该方案的设备组成为22×12个半桥子模块+22×12个全桥子模块, 损耗约为2.180%。

方案3给出的是无联结变压器非对称式柔性环

网控制器, 其中一端换流器为半桥型, 另一端换流器为混合型, 其混合型换流器全桥子模块约为半桥子模块的32%, 对于整个两端型柔性环网控制器而言, 换流器所增加的成本为14.8%^[21], 但应用于多端配电网时, 该方案需增加混合型换流器, 即便如此也难以抑制故障扩大。该方案的设备组成为22×12个半桥子模块+7×6个全桥子模块, 损耗为1.133%。

本文提出的方案4相较于方案3成本进一步压缩, 减少了全桥子模块数量, 全桥子模块仅为半桥子模块的14%, 且对于两端型柔性环网控制器而言, 换流器成本仅增加8.9%, 同时也可抑制直流侧电压波动, 从源头上阻止故障分量由故障侧传递到非故障侧, 且本文方案在多端配电网同样适用, 扩展性强。本文方案的设备组成为22×12个全桥子模块+9×2个全桥子模块, 损耗为1.660%(已将直流侧全桥子模块损耗整合到换流器损耗中)。

各个方案的经济性对比如表1所示。

表1 柔性环网控制器方案经济性对比
Table 1 Economic comparison of flexible ring network controller schemes

方案	占地 面积	换流器 损耗/%	稳态运行性能		暂态运行性能(交流侧故障下)	设备组成	总成本/ 万元
			有功功率	无功功率			
1	最大	1.932	相同	相同	无零序电流, 直流侧电压波动	1台联结变压器+22×12个半桥子模块+22×6个全桥子模块	119.4
2	中	2.180	相同	相同	附加控制抑制零序电流, 直流侧电压波动	22×12个半桥子模块+22×12个全桥子模块	212.3
3	小	1.133	相同	相同	附加控制抑制零序电压传递, 直流侧电压波动	22×12个半桥子模块+7×6个全桥子模块	71.6
4	最小	1.660	相同	相同	无零序电压传递, 直流侧电压无波动	22×12个半桥子模块+9×2个全桥子模块	62.6

由表1可以看出, 虽然在两端MMC下, 本文所提方案4损耗大于方案3, 但是方案3难以扩展到三端及以上, 本文方案在三端情况下损耗占比进一步降低。

方案1、方案2由于子模块个数较多, 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)数量同样增加, 其成本均远高于方案3、方案4。各方案均在前述相同条件下运行, 各方案换流器子模块IGBT峰值电流为桥臂电流, 按2倍裕量均选择型号FF150R17KE4, 单个价格为973元; 方案4由于故障时直流侧电压为共模波动, 故障前后对直流电流的影响很小, 因此直流侧子模块IGBT按直流侧电流2倍裕量选择型号FF200R17KE4, 单个价格为1046元; 方案1变压器型号为S11-M-2500, 价格为115000元。方案1至4总成本分别为119.4万元、212.3万元、71.6万元和

62.6万元。综上所述, 本文所提方案4成本优势较为明显。

4 仿真验证

本章通过在MATLAB/Simulink中搭建如图2和附录A图A1所示的模型对前述分析进行验证, 仿真参数见附录A表A1。

4.1 两端MMC仿真

4.1.1 两端MMC仿真参数

两端换流器MMC1和MMC2采用相同的配置结构和交流电网参数, 仿真模型见图2, 仿真参数见附录A表A1。正常工作下, MMC1采取定有功功率工作模式, MMC2采取定直流电压工作模式。

4.1.2 交流故障后两端MMC响应特性

$t_1=0.593$ s时, MMC1交流侧发生c相接地故障; $t_2=0.693$ s时直流侧全桥子模块投入运行进行

抑制; $t_3=0.8$ s时恢复正常运行,同时全桥子模块切出。图5给出了故障后两端MMC响应特性,其中 $U_{s,j}$ 、 $I_{s,j}$ ($s=a, b, c; j=1, 2$) 分别为MMC j 交流侧 s 相电压与电流。

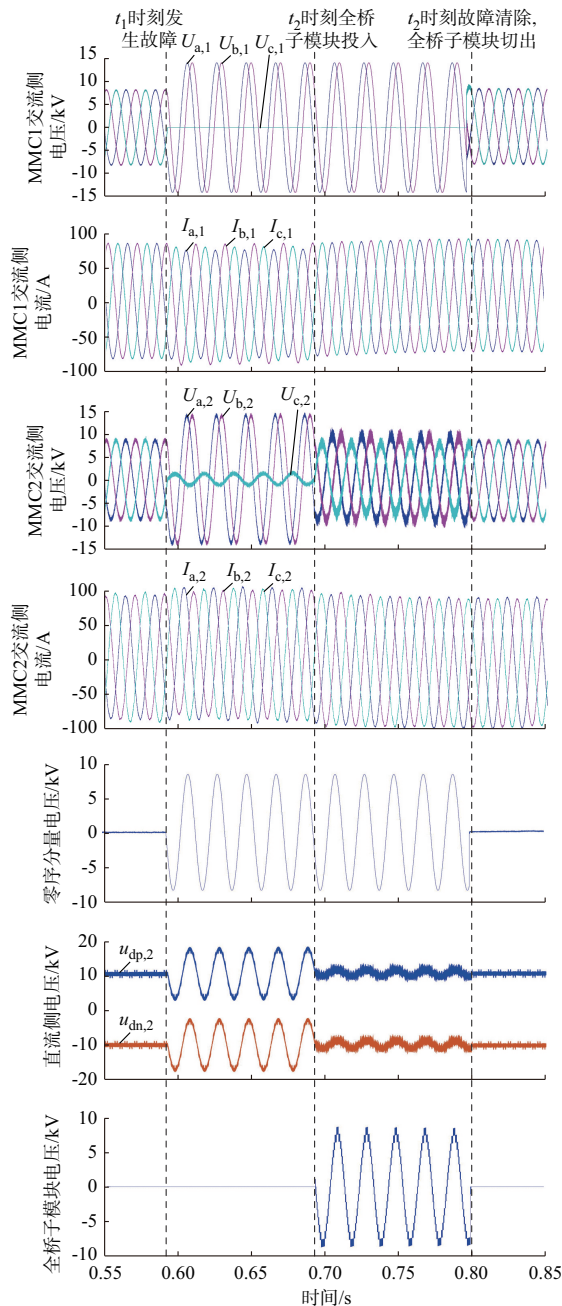


图5 故障后两端MMC响应特性

Fig. 5 Response characteristics of two-terminal MMC after fault

由图5可知, $t_1 \sim t_2$ 时刻, MMC1交流侧故障后, c 相电压变为0, a, b 相电压抬升为线电压幅值的 $\sqrt{3}$ 倍,故障零序电压与交流侧正常相电压幅值相同,直流侧电压分量相位变换与故障分量统一,此时短时间内系统还能正常工作,但故障零序电压分量

会传递到MMC2交流侧,其电压波形与MMC1交流侧电压类似, c 相电压的幅值为1.5 kV, a, b 相电压幅值为14.1 kV。 $t_2 \sim t_3$ 时刻,直流侧每极9个全桥子模块投入后,直流电压波动立即消失,同时MMC2交流侧电压恢复对称稳定,表明故障零序电压分量得到较好的抑制,阻止了故障范围进一步扩大。9个全桥子模块投入后,其峰值电压为8.1 kV,电平数为18,与理论分析一致。

4.2 三端MMC仿真

4.2.1 三端MMC仿真参数

三端换流器MMC1、MMC2和MMC3采用相同的配置结构和交流电网参数,仿真模型如附录A图A1所示,仿真参数与两端MMC类似,参考表A1。正常工作下,MMC2采取定直流电压工作模式,MMC1和MMC3采取定有功功率工作模式。

4.2.2 交流故障后三端MMC响应特性

$t_1=0.393$ s时,MMC1交流侧发生 c 相接地故障; $t_2=0.493$ s时,直流侧全桥子模块投入运行进行抑制; $t_3=0.6$ s时恢复正常运行,子模块切出。故障后三端MMC响应特性见附录A图A3,其中,为避免重复,三相用 x, y, z 表示。

由附录A图A3可知, $t_1 \sim t_2$ 时刻, MMC1交流侧故障后, c 相电压变为0, a, b 相电压抬升为线电压幅值的 $\sqrt{3}$ 倍,故障零序电压与交流侧正常相电压幅值相同,直流侧电压分量相位变换与故障分量统一,此时短时间内系统还能正常工作,但故障零序电压分量会传递到MMC2和MMC3交流侧,其电压波形与MMC1交流侧电压类似, MMC2的 c 相电压的幅值为3.6 kV, a, b 相电压幅值为13.6 kV, MMC3的 c 相电压幅值为3.4 kV, a, b 相电压幅值为13.7 kV。 $t_2 \sim t_3$ 时刻, MMC1直流侧正负极全桥子模块与MMC2、MMC3直流侧全桥子模块投入后,故障电压分量由直流侧出口10个全桥子模块串联叠加抑制,直流电压波动立即消失,同时MMC2和MMC3交流侧电压恢复对称稳定,表明故障零序电压分量得到较好的抑制,阻止了故障范围进一步扩大。5个全桥子模块投入后,其峰值电压为4.5 kV,电平数为11,与理论分析一致。

本文给出了两端及三端MMC拓扑仿真模型数据,详见本文支撑数据,供有兴趣的读者参考。

5 结语

本文提出的无变压器柔性环网控制器拓扑结构利用全桥子模块正负电压输出能力,补偿故障产生的零序电压,维持直流侧正负极电压稳定,阻止故障

范围进一步扩大,仿真证明了柔性环网控制器的拓扑结构有效性。

本文初步验证了所提拓扑的有效性,但故障发生期间整体时序性仍有待深入研究。未来将继续对全桥子模块控制方式进行深入研究,进一步减少子模块,同时全桥子模块的其他替代拓扑或电路也是重点研究内容。

本文中仿真模型数据已共享,可在本刊网站支撑数据处下载(<http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20210806005>)。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 诸晓骏,陈曦,李妍,等.考虑电动汽车接入的主动配电网优化调度[J].电力工程技术,2021,40(3):141-147.
ZHU Xiaojun, CHEN Xi, LI Yan, et al. Optimal dispatching of active distribution network considering electric vehicle access[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 141-147.
- [2] 吴在军,谢兴峰,杨景刚,等.直流配电网电压控制技术综述[J].电力工程技术,2021,40(2):59-67.
WU Zaijun, XIE Xingfeng, YANG Jinggang, et al. A review on voltage control strategies in DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 59-67.
- [3] 霍群海,李梦菲,栗梦涵,等.柔性多状态开关应用场景分析[J].电力系统自动化,2021,45(8):13-21.
HUO Qunhai, LI Mengfei, SU Menghan, et al. Analysis on application scenarios of flexible multi-state switch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 13-21.
- [4] 胡鹏飞,朱乃璇,江道灼,等.柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J].电力系统自动化,2021,45(8):2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.
- [5] 祁琪,姜齐荣,许彦平.智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J].电网技术,2020,44(12):4664-4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4664-4676.
- [6] 尹璐,易姝娴,张凯,等.基于柔性环网控制装置的10 kV配电网运行方式[J].电力自动化设备,2018,38(1):137-142.
YIN Lu, YI Shuxian, ZHANG Kai, et al. Operation mode of 10 kV distribution network with flexible looped network controller [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 137-142.
- [7] 姜田贵,谢晔源,李洪涛,等.中性点经消弧线圈接地系统中柔性环网控制装置接地故障分析[J].电力建设,2016,37(5):146-152.
JIANG Tianguai, XIE Yeyuan, LI Hongtao, et al. Grounding fault analysis of flexible loop network control device in neutral point grounding system with arc suppression coil [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(5): 146-152.
- [8] 刘黎,卢志飞,戴涛,等.改进的混合直流断路器方案[J].电源学报,2019,17(2):124-131.
LIU Li, LU Zhifei, DAI Tao, et al. Scheme of modified hybrid DC circuit breaker[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(2): 124-131.
- [9] 周沫.城市配电网规划设计与建设改造[J].现代工业经济和信息化,2021,11(9):49-50.
ZHOU Mo. Urban distribution network planning, design and construction transformation [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2021, 11(9): 49-50.
- [10] 杨勇,李继红,周自强,等.智能配电柔性多状态开关技术、装备及示范应用[J].高电压技术,2020,46(4):1105-1113.
YANG Yong, LI Jihong, ZHOU Ziqiang, et al. Technology, equipment and demonstration application of flexible multi-state switch in intelligent distribution network [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1105-1113.
- [11] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等.新型配电系统形态特征与技术展望[J].高电压技术,2021,47(9):3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [12] 杨欢,蔡云旖,屈子森,等.配电网柔性开关设备关键技术及其发展趋势[J].电力系统自动化,2018,42(7):153-165.
YANG Huan, CAI Yunyi, QU Zisen, et al. Key techniques and development trend of soft open point for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 153-165.
- [13] 李鹏飞,李霞林,王成山,等.中低压柔性直流配电系统稳定性分析模型与机理研究综述[J].电力自动化设备,2021,41(5):3-21.
LI Pengfei, LI Xialin, WANG Chengshan, et al. Review of stability analysis model and mechanism research of medium-and low-voltage flexible DC distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 3-21.
- [14] 张章,胡源,罗涛,等.中压直流配电系统保护技术研究综述[J].电测与仪表,2020,57(23):109-118.
ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 109-118.
- [15] 李钢,田杰,卢宇,等.无联结变压器MMC-MVDC配电网零序电压抑制策略[J].电力建设,2018,39(7):57-63.
LI Gang, TIAN Jie, LU Yu, et al. Zero-sequence voltage-suppressing control strategy for MMC-MVDC without coupling transformer [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 57-63.
- [16] 马文忠,吕清琛,张彦,等.配电网故障状态下柔性多状态开关故障电流抑制策略[J].电网技术,2021,45(11):4251-4258.
MA Wenzhong, LÜ Qingchen, ZHANG Yan, et al.

- Suppression strategy for fault current of flexible multi-state switch in distribution network fault state [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4251-4258.
- [17] 周永荣, 秦文康, 葛佳盛, 等. 柔性直流配电系统换流器交流侧接地故障的分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 160-167.
ZHOU Yongrong, QIN Wenkang, GE Jiasheng, et al. Analysis of grounding fault on the AC side of converter station in a flexible DC distribution system [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 160-167.
- [18] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于MMC的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1): 1-10.
DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1): 1-10.
- [19] 高凯, 阳岳希, 张艳军, 等. 适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑方案研究[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 78-85.
GAO Kai, YANG Yuexi, ZHANG Yanjun, et al. A topology research of flexible looped network controller suitable to urban power grid [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 78-85.
- [20] 张艳军, 周季, 高凯, 等. 柔性环网控制器原理及紧凑化研究[J]. *智能电网*, 2017, 5(5): 434-441.
ZHANG Yanjun, ZHOU Ji, GAO Kai, et al. Research on the principle and compact of flexible looped network controller [J]. *Smart Grid*, 2017, 5(5): 434-441.
- [21] 许烽, 陆翌, 李继红, 等. 无变压器非对称式柔性多状态开关的零序抑制策略[J]. *高电压技术*, 2019, 45(10): 3084-3091.
XU Feng, LU Yi, LI Jihong, et al. Zero-sequence suppression strategy of transformerless asymmetric flexible multi-state switch [J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(10): 3084-3091.
- [22] 田新华. 柔性直流输电系统损耗分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
TIAN Xinhua. Loss analysis of the flexible DC transmission system [D]. Changsha: Hunan University, 2018.

李 峥(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 柔性交流输电。E-mail: 826842878@qq.com

陈 武(1981—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 功率电子变换技术及特种工业电源。E-mail: chenwu@seu.edu.cn

侯 凯(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力电子技术、储能技术。E-mail: houkai@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 蔡静雯)

Flexible Ring Network Controller Without Interface Transformer for Medium Voltage Distribution Network

LI Zheng¹, CHEN Wu¹, HOU Kai², SHI Mingming³, MOU Xiaochun², ZHU Jinsong⁴

(1. Center for Advanced Power-conversion Technology and Equipment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: For the flexible ring network controller without the interface transformer, the transmission of the zero-sequence voltage component cannot be prevented when the fault occurs at the AC side, thus increasing the fault range. Therefore, this paper uses the classical circuit analysis method and positive and negative sequence analysis algorithm to explain the basic principles of the formation and transmission of zero-sequence voltage components. A topology of the flexible ring network controller without the interface transformer is proposed. The AC side converters are all modular multilevel converters with traditional half-bridge sub-modules. And the full-bridge sub-module valve strings are connected in series on the positive and negative polarity busbars. Utilizing the ability of the full-bridge sub-module outputting positive and negative voltages, the DC-side voltage fluctuations are suppressed, and the fault range expanding is prevented. By using the MATLAB/Simulink software, the characteristics of zero-sequence voltage suppressed during the fault are simulated and analyzed. The simulation results verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed topology.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China for Excellent Young Scholars (No. 51922028).

Key words: medium voltage distribution network; electromagnetic ring network; flexible ring network controller; modular multilevel converter (MMC); single-phase ground fault

