

交流侧故障下 MMC-HVDC 能量平衡控制策略

夏向阳[†], 黄智¹, 赵昕昕¹, 梁军², 曾小勇¹, 汤赐¹, 刘远¹, 石超¹

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410014;

2. 卡迪夫大学 工程学院, 英国 卡迪夫 CF10 3XQ)

摘要:针对模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电系统(MMC-HVDC)在交流侧故障下的常规控制方法存在换流器内部能量难以快速控制, 交流侧故障导致各桥臂间能量可能出现不平衡等问题. 从换流器内部机理的控制角度出发, 提出了基于能量平衡控制的 MMC 控制方法, 该方法通过优化控制 MMC 各桥臂电流分量来调节换流器桥臂间的功率流向, 实现交流侧电流与换流器内部能量的协同控制, 有效抑制换流器在系统故障过程中所引起的内部能量不均衡过程. 最后, 通过 MATLAB/Simulink 平台搭建了 37 电平 MMC-HVDC 仿真模型, 仿真结果验证了所提出控制策略的有效性.

关键词:输电系统; 模块化多电平换流器; 交流侧故障; 能量平衡控制

中图分类号: TM46

文献标志码: A

Energy Balancing Control Strategy of MMC-HVDC under AC Fault

XIA Xiangyang[†], HUANG Zhi¹, ZHAO Xinxin¹, LIANG Jun²,

ZENG Xiaoyong¹, TANG Ci¹, LIU Yuan¹, SHI Chao¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF10 3XQ, UK)

Abstract: Since it is difficult to quickly control the internal energy of the converter, which may cause problems such as unbalanced energy between the arms in the modular multilevel converter based high voltage direct current (MMC-HVDC) system, this paper proposes a control strategy of MMC based on energy balancing control from the internal mechanism of the converter, optimizing the control of the current components of each arm. The control strategy can realize the coordinated control of the AC side current and the internal energy of the converter, and effectively reduce the internal energy unbalanced process caused by the converter during the system fault process. Finally, the MMC simulation model is built on MATLAB/Simulink, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: transmission system; Modular Multilevel Converter(MMC); AC fault; energy balancing control

* 收稿日期: 2018-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51977014), National Natural Science Foundation of China(51977014); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ4025), Human Province Natural Science Foundation(2018JJ4025)

作者简介: 夏向阳(1968—), 男, 湖南长沙人, 长沙理工大学教授, 博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: 307351045@qq.com

基于模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电是一种新型的灵活输电方式,可为解决大规模清洁能源并网等问题提供方法,同时为全球能源互联网的构建提供了理论和实践基础^[1-2]. MMC 正常运行下输出电压稳定且子模块开关频率低,减少了开关损耗,但其发生故障时其内部运行机理和规律难以分析,导致换流器内部能量流动无法实现很好的控制^[3-5].

目前实际工程应用中,当电网发生严重的三相短路故障时,通过灵活的交流电流控制,可使换流器输出电流降低到零,减少换流器馈入交流系统的短路电流,能够阻断一侧交流系统故障向另一侧交流系统蔓延^[6-9];当交流侧出现不平衡故障时,功率的波动将改变桥臂子模块的能量分布,能量的改变将引起子模块电容电压的不平衡,影响系统的输出电压/电流质量^[10];同时,MMC 的特殊拓扑要求其内部各桥臂电压需保持均衡,即使在发生故障时其内部能量平衡也需要得到保证,因此如何实现交流侧故障下 MMC 内外部协同控制,提高输电系统的故障保护能力等问题仍需面对与解决^[11-13]. 文献 [14-15] 对正常工作下及交流侧发生故障下的换流器内部能量变化机理进行了深入的研究,分析得出换流器桥臂电流的环流分量会对其各桥臂内部的功率变换产生影响,但存在控制复杂度较高的问题. 文献 [16-19]提出了一种基于桥臂电流控制的 MMC 控制方法,所提方法通过提取并利用桥臂电流的各电流分量对换流器进行控制,在一定程度上降低了控制的复杂度,但并未提出针对交流侧发生不平衡故障的控制策略.

因此,在现有研究基础上,本文提出了一种基于能量平衡的 MMC 控制方法. 通过深入分析换流器功率流向与桥臂电流各分量的关系,提出基于能量平衡控制的换流器功率优化调节方法,采用优化控制各桥臂各电流分量调节 MMC 功率分布,能够同时实现换流器正常工作及交流侧故障下的交流侧三相电流对称及换流器内部能量平衡,最后本文通过仿真对比验证了所提方法的优越性.

1 模块化多电平换流器数学模型与机理分析

1.1 MMC 模型结构与工作机理分析

图 1 为 MMC 的拓扑结构,它包含 6 个桥臂,单

个桥臂包含 N 个子模块(SM)和一个串联电抗器 L_0 ,每相上下两个桥臂构成一个相单元,三个相单元构成一个完整的三相模块化多电平换流器. 其中, v_u^k 、 v_l^k 分别为换流器上下桥臂端口电压; i_u^k 、 i_l^k 分别为换流器上下桥臂电流; v_s^k 、 i_s^k 分别为交流侧各相电压和电流; z_s 、 z_a 分别为交流网侧等效阻抗和桥臂等效阻抗; V_{DC} 、 V_u^{DC} 、 V_l^{DC} 分别为高压直流侧电压及上下极电压. 其中, $k = a, b, c$.

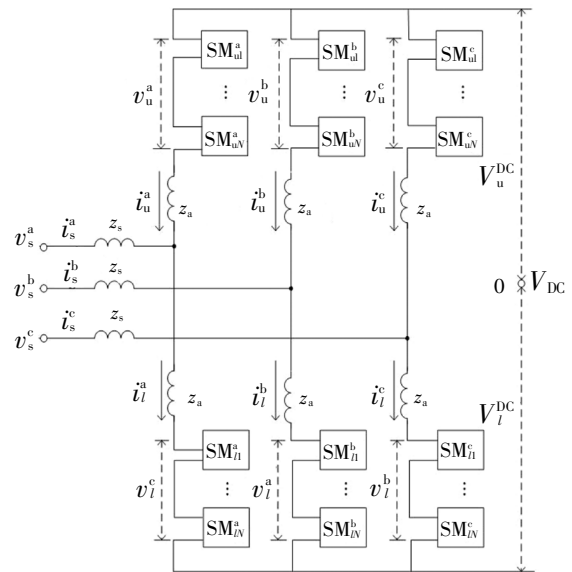


图 1 MMC 结构示意图

Fig.1 The structure of MMC

一般地,将损耗 MMC 的忽略,其桥臂电流可分解为:

$$\begin{cases} i_u^k = 0.5i_s^k + i_{k_add} \\ i_l^k = -0.5i_s^k + i_{k_add} \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{k_add} = i_{k_dc} + i_{k_cir} \quad (2)$$

式中: i_{k_add} 为换流器的 k 相环流,包含 k 相直流母线电流分量 i_{k_dc} 和 k 相交流环流分量 i_{k_cir} .

根据能量守恒定律,可得到 MMC 功率关系为:

$$P_{k_s} = P_{k_dc} + P_{k_u} + P_{k_l} \quad (3)$$

式中: P_{k_s} 为 MMC 由交流侧吸收的一个周期平均有功功率; P_{k_dc} 为 MMC 输出到直流侧的一个周期平均有功功率; P_{k_u} 和 P_{k_l} 分别为 MMC 上下桥臂一个周期平均有功功率. 正常工作时,忽略其器件损耗,则 MMC 由交流侧吸收的有功功率与输出到直流侧的有功功率相等(以整流端为例,逆变端同理),他们之间的关系如式(4)所示,其中 T 为一个周期.

$$P_{k,s} = P_{k,dc} + \frac{1}{T} \int_0^T v_s^k i_s^k dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_{DC} i_{k,dc} dt \quad (4)$$

1.2 交流侧电压不平衡条件下机理分析

由式(4)可知,忽略 MMC 器件损耗,交流侧三相有功功率 $P_{k,s}$ 与换流器三相桥臂输出到直流侧的有功功率 $P_{k,dc}$ 相等,若不调整有功功率分布,在交流侧三相电压 v_s^k 不对称情况下,交流侧三相电流 i_s^k 也必然不平衡,其关系为:

$$\begin{cases} P_{a,s} = P_{b,s} = P_{c,s} \\ P_{k,s} = P_{k,dc} \Rightarrow i_s^a \neq i_s^b \neq i_s^c \\ v_s^a \neq v_s^b \neq v_s^c \end{cases} \quad (5)$$

若控制交流侧三相电流 i_s^k 对称,由于交流侧三相电压 v_s^k 不对称,则换流器三相桥臂由交流侧吸收的有功功率 $P_{k,s}$ 将会不相等,即

$$P_{a,s} \neq P_{b,s} \neq P_{c,s} \quad (6)$$

结合式(4)和(6)分析可知,若不调节 MMC 输出到直流侧功率在三相桥臂的分布,必然会导致换流器内部能量的失衡,因此在保证 MMC 各相桥臂吸收与输出功率平衡的前提下,通过调整三相桥臂电流直流母线电流分量 $i_{k,dc}$ 在 MMC 三相桥臂间的分布,以控制换流器与直流侧及各桥臂间的功率交换,可实现交流侧三相电流对称。

桥臂电流的直流母线电流分量 $i_{k,dc}$ 通过直流线路构成回路,是直流输电的工作电流,该分量控制换流器与直流侧及各桥臂间的功率交换,两者间的关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,dc} \\ i_{\beta,dc} \\ i_{0,dc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3V_{DC}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{sum} \\ P_{a \rightarrow b} \\ P_{a \rightarrow c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $i_{\alpha,dc}$ 、 $i_{\beta,dc}$ 、 $i_{0,dc}$ 由 $i_{k,dc}$ 经 Clark 变换所得; P_{sum} 、 $P_{a \rightarrow b}$ 、 $P_{a \rightarrow c}$ 分别为故障条件下换流器和直流侧间所需的总功率交换值、a 相和 b 相桥臂间及 a 相和 c 相桥臂间所需的功率交换值。

由式(7)分析可知, $i_{0,dc}$ 与换流器和直流侧的总功率交换直接相关,而 $i_{\alpha,add,dc}$ 、 $i_{\beta,add,dc}$ 则共同控制换流器内部各相间的功率交换,调节直流母线功率在各相间的分布,可实现在维持交流侧三相电流对称的同时,保证 MMC 三相间的能量平衡。

考虑到工程实际中换流器上下桥臂存在差异,可以通过调节 MMC 上下桥臂电流的交流环流分量 $i_{k,cir}$, 实现 MMC 上下桥臂的能量平衡^[20], 如式(8)所示。

$$P_{k,u-l} = P_{k,u} - P_{k,l} = \frac{1}{T} \int_0^T 2u_s^k i_{k,cir} dt \quad (8)$$

式中: $P_{k,u-l}$ 为 MMC 各相上下桥臂所需的功率交换。

综上所述,通过调节桥臂电流的各电流分量可调节直流母线功率在 MMC 三相间的分布以及上下桥臂间的交流有功交换,对于如何控制 MMC 三相间及各相上下桥臂的有功功率交换将作为本文重点之一将在下节详细阐述。

2 基于能量平衡控制的 MMC 功率分布调节

由第 1 节分析可知,MMC 交流电压不平衡时,控制交流侧三相电流对称,若不调节 MMC 输出到直流侧功率在三相桥臂的分布,将会导致换流器内部能量的不平衡,因此本文从控制 MMC 总能量及各桥臂能量均衡的角度出发,调节直流母线功率在各相间的分布以及确定上下桥臂间的交流有功交换。

能量平衡控制通过控制换流器各桥臂间的能量平衡来求解所需的功率交换值,各能量变量之间的关系如下所示。

$$E_{k,u} = 0.5 \frac{C_m}{N} (v_{ku-cap})^2 \quad (9)$$

$$E_{k,l} = 0.5 \frac{C_m}{N} (v_{kl-cap})^2 \quad (10)$$

式中: $E_{k,u}$ 、 $E_{k,l}$ 分别为换流器 k 相上桥臂和下桥臂的能量; v_{ku-cap} 、 v_{kl-cap} 分别为各相上桥臂和下桥臂子模块电容电压之和; C_m 、 N 分别为子模块电容和换流器各桥臂子模块数量。

换流器内部总能量及各桥臂间能量差(以 a 相为基准),可分别表示为:

$$E_{sum} = \sum E_{k,u} + \sum E_{k,l} \quad (11)$$

$$E_{a \rightarrow b} = (E_{a,u} + E_{a,l}) - (E_{b,u} + E_{b,l}) \quad (12)$$

$$E_{a \rightarrow c} = (E_{a,u} + E_{a,l}) - (E_{c,u} + E_{c,l}) \quad (13)$$

$$E_{k,u-l} = E_{k,u} - E_{k,l} \quad (14)$$

式中: E_{sum} 、 $E_{a \rightarrow b}$ 、 $E_{a \rightarrow c}$ 、 $E_{k,u-l}$ 分别为换流器内部总能量、a 相与 b 相的能量差、a 相与 c 相的能量差、各相上下桥臂的能量差。

2.1 直流母线功率分布

总能量参考值 $E_{sum,ref}$ 设为额定值(设置 $\pm 10\%$ 的误差),如式(15)所示。a 相与 b 相的能量差、a 相与 c 相的能量差 $E_{a \rightarrow b,ref}$ 、 $E_{a \rightarrow c,ref}$ 均设为 0。

$$E_{sum,ref} = 6 \times 0.5 \frac{C_m}{N} (Nv_m)^2 \quad (15)$$

式中: v_m 为子模块的额定工作电压。

由于交流侧电压不平衡,MMC 从交流侧吸收的

总有功率发生变化,因此需控制 MMC 总能量追踪其额定值,调节换流器与直流电网间的功率交换.同时,控制各桥臂能量的均衡,以调节直流母线功率在三相桥臂中的分布,实现交流侧三相电流对称.基于能量控制的直流母线功率分布调节控制如图 2 所示,分别得到各功率交换参考值 P_{sum_ref} 、 $P_{a \rightarrow b_ref}$ 、 $P_{a \rightarrow c_ref}$.

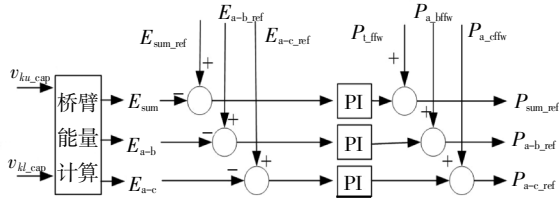


图 2 直流母线功率分布调节控制

Fig.2 DC power distribution regulation control

同时,为提升控制器的鲁棒性,针对换流器总能量控制及相间能量平衡控制回路增加了前馈环节.其中, P_{a_bffw} 、 P_{a_bfff} 和 P_{a_cfff} 分别表示为:

$$P_{a_bffw} = \sum v_s^k i_s^k \quad (16)$$

$$P_{a_bfff} = v_s^a i_s^a - v_s^b i_s^b \quad (17)$$

$$P_{a_cfff} = v_s^a i_s^a - v_s^c i_s^c \quad (18)$$

2.2 各相上下桥臂交流有功功率交换

为使 MMC 上下桥臂电容电压各自的平均值达到平衡,将 $E_{ku_l_ref}$ 设为 0,通过控制各相上下桥臂的能量均衡,求解 MMC 各相上下桥臂交流有功功率交换.基于能量控制的上下桥臂交流有功功率交换控制如图 3 所示,最后得到上下桥臂交流有功功率交换参考值 $P_{ku_l_ref}$.

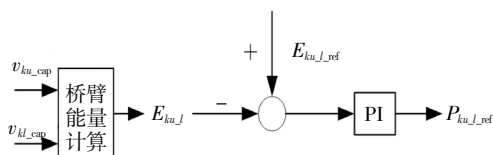


图 3 上下桥臂交流有功功率交换控制

Fig.3 Upper and lower arm active power exchange control

3 MMC 能量平衡控制策略

3.1 整体控制框架

交流侧故障下 MMC 能量平衡控制结构如图 4 所示.采用定有功、无功控制得到交流电网三相电流参考值 I_s^k ;能量平衡控制换流器内部能量均衡,调节换流器的功率分布得到所需的功率交换参考,实现交流侧三相电流对称以及换流器能量平衡;结合 1.2 节的功率交换与桥臂电流分量的关系分析,得到

控制变量 $I_{k_add_ref}$;结合主控制器及能量平衡控制器分别得到的控制变量,并由式(1)分析得到各相上下桥臂电流参考值 I_{ku_ref} 、 I_{kl_ref} .

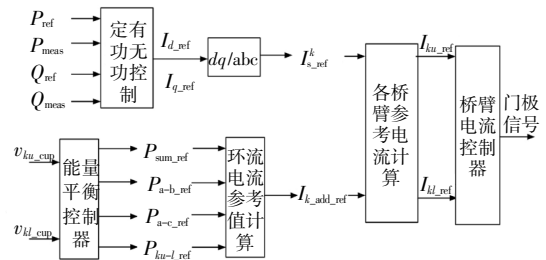


图 4 MMC-HVDC 整体控制框架

Fig.4 MMC-HVDC overall control framework

3.2 定有功无功控制

定有功无功控制确定交流电网三相电流参考值 I_s^k ,如图 5 所示.

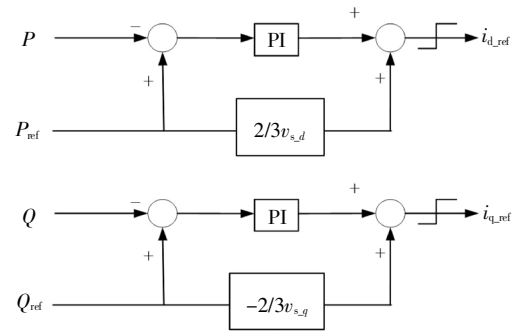


图 5 定有功无功控制

Fig.5 Active and reactive power control loop

其中, $v_{s,d}$ 、 $v_{s,q}$ 由交流三相电压 v_s^k 作 dq 分解得到.为防止电流越限,在控制回路末端增加了限幅环节,限幅值随运行工况变化而变化,最后,交流电网电流 dq 轴分量参考值 i_{d_ref} 、 i_{q_ref} 经坐标变换为三相电流参考 I_g^k .

3.3 功率分布调节

能量平衡控制得到控制变量 P_{sum_ref} 、 $P_{a \rightarrow b_ref}$ 、 $P_{a \rightarrow c_ref}$ 、 $P_{ku_l_ref}$,结合 1.2 节分析内容求解桥臂电流直流母线分量参考值 $i_{k_dc_ref}$ 和交流有功电流分量 $i_{k_cir_ref}$.

直流母线电流分量参考值根据控制变量 P_{sum_ref} 、 $P_{a \rightarrow b_ref}$ 、 $P_{a \rightarrow c_ref}$ 变换求得 $i_{\alpha_dc_ref}$ 、 $i_{\beta_dc_ref}$ 、 $i_{0_dc_ref}$,经反 Clark 变换得到 $i_{k_dc_ref}$,如式(19)所示.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha_dc_ref} \\ i_{\beta_dc_ref} \\ i_{0_dc_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{3V_{DC}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{sum_ref} \\ P_{a \rightarrow b_ref} \\ P_{a \rightarrow c_ref} \end{bmatrix} \quad (19)$$

交流有功环流分量参考值 $i_{k_cir_ref}$ (与交流电流同相同频)由式(20)推导求得.

$$P_{ku-l_ref} = 2u_s^k i_{k_cir_ref} \Rightarrow i_{k_cir_ref} = \frac{P_{ku-l_ref}}{2u_s^k} \quad (20)$$

MMC 各相桥臂环流参考值为:

$$i_{k_add_ref} = i_{k_dc_ref} + i_{k_cir_ref} \quad (21)$$

3.4 桥臂电流控制器

由式(1)分析可知,各桥臂电流由交流侧电流及附加电流组成,则各桥臂电流参考值 $i_{ku_ref}^k$ 、 $i_{kl_ref}^k$ 可用所求出的交流三相电流参考值 i_s^k 和各相环流参考值 $i_{k_add_ref}$ 表示,即

$$\begin{cases} i_{ku_ref}^k = 0.5i_s^k + i_{k_add_ref} \\ i_{kl_ref}^k = -0.5i_s^k + i_{k_add_ref} \end{cases} \quad (22)$$

桥臂电流控制器结构如图 6 所示^[17,19-20],该控制器将 k 相桥臂电流追踪其参考值得到的初始信号 d_{ku_f} 、 d_{kl_f} 与 k 相静态占空比 D_{ku} 、 D_{kl} 叠加得到最终控制信号 d_{ku} 、 d_{kl} ,如式(23)所示,同时为提高直流电压的利用率,人为添加了一个零序电压信号 v_0 .

$$\begin{cases} d_{ku} = D_{ku} + d_{ku_f} \\ d_{kl} = D_{kl} - d_{kl_f} \end{cases} \quad (23)$$

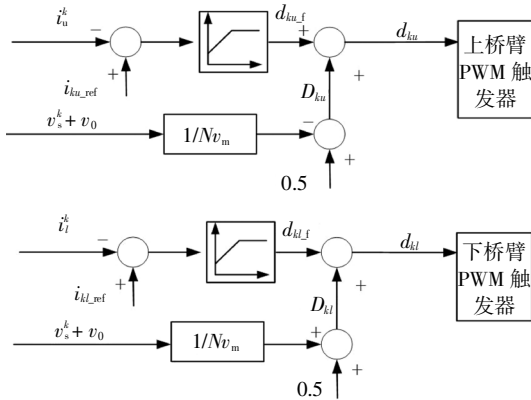


图 6 桥臂电流控制器结构

Fig.6 The structure of arm current controller

4 仿真分析

为了更好验证所提控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建了 37 电平 MMC-HVDC 仿真模型,模型结构如图 7 所示,直流侧采用由理想开关和受控电压源组成的等效电路模型.主要参数设置如表 1 所示.

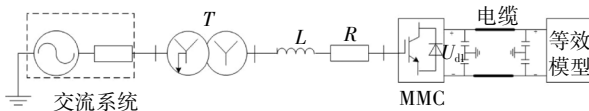


图 7 MMC-HVDC 系统仿真模型结构图

Fig.7 Structure of MMC-HVDC system simulation model

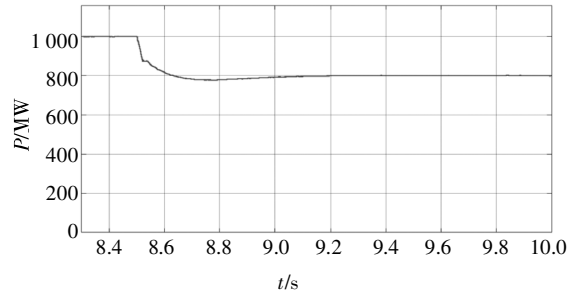
表 1 仿真平台主要参数

Tab.1 Parameters of simulation platform system

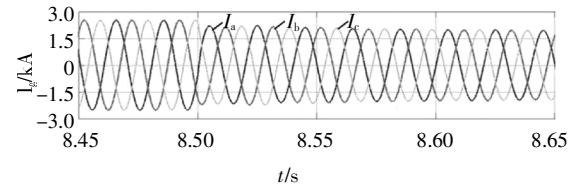
| 名称 | 数值 |
|------------------|------------------------------|
| 交流系统额定电压/kV | 400 |
| 交流系统电感/mH | 56 |
| 系统额定频率/Hz | 50 |
| 系统额定有功功率/MW | 1 000 |
| 变压器额定电压/kV | 400/333(Y_g/Y) |
| 变压器额定功率/(MV·A) | 1 000 |
| 变压器漏抗/% | 5 |
| 电缆参数 | 0.5 Ω + 0.015 H |
| 桥臂阻抗 | 0.171 3 Ω + 0.052 9 H |
| 稳态直流电压/kV | 640 |
| 子模块额定电容/ μ F | 3 300 |
| 子模块额定电容电压/kV | 17.78 |

4.1 交流侧三相电压对称时的仿真结果

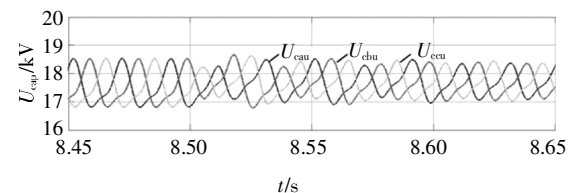
直流电压保持恒定,将有功参考值在 $t = 8.5$ s 时由 1 000 MW 阶跃到 800 MW,无功功率维持在额定值 250 Mvar 不变.系统有功阶跃仿真结果如图 8 所示,可以看出系统在 $t = 8.5$ s 发生有功阶跃时,交流侧电流保持平衡,换流器内部各桥臂电容电压平均值也保持对称.



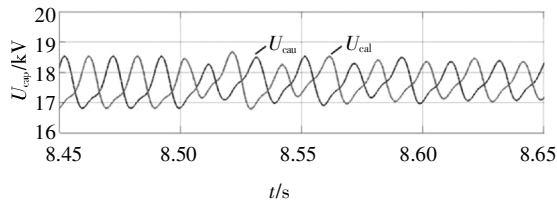
(a)系统有功



(b)交流侧电流



(c)各相上桥臂子模块电容电压平均值

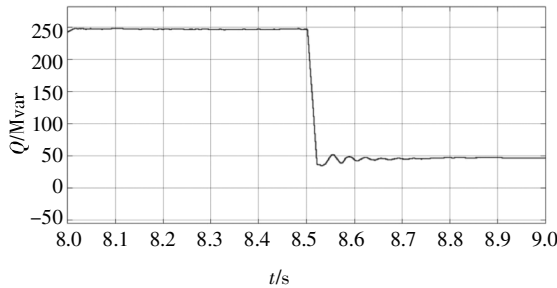


(d)a相上下桥臂电容电压平均值

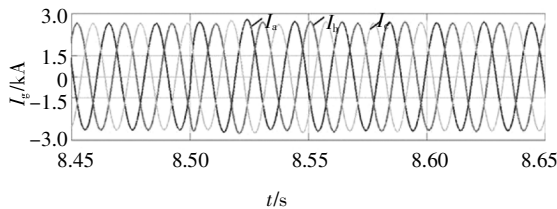
图8 有功阶跃时系统仿真结果

Fig.8 System simulation results in active power step

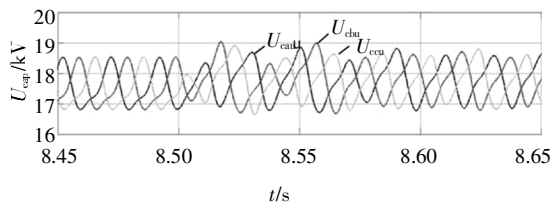
直流电压保持恒定,无功参考值在 $t = 8.5\text{ s}$ 时由 250 Mvar 阶跃到 50 Mvar,有功参考值维持在额定值 1 000 MW 不变.系统无功阶跃仿真结果如图 9 所示,交流侧电流保持平衡,换流器内部各桥臂电容电压平均值在 $t=8.5\text{ s}$ 时发生波动,但很快恢复稳定.



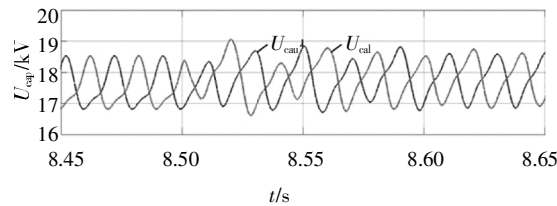
(a)系统无功



(b)交流侧电流



(c)各相上桥臂子模块电容电压平均值



(d)a相上下桥臂电容电压平均值

图9 无功阶跃时系统仿真结果

Fig.9 System simulation results in inactive power step

仿真结果及分析可知,正常工作条件下所提出的控制策略与常规的控制方法相同,均能保证 MMC 的稳定运行.

4.2 交流侧电压不对称时的仿真结果

为验证本文所提控制策略在交流侧故障下的优越性能,对 MMC 交流侧电压不平衡的运行状态进行了仿真分析, $t = 8\text{ s}$ 时,在变压器高压侧发生故障,如图 10 所示,此时的交流侧三相电压波形如图 11 所示,b 相电压远低于其余两相.

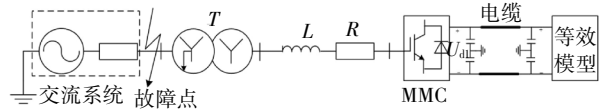


图10 MMC-HVDC 系统故障仿真模型结构图

Fig.10 Structure of MMC-HVDC system fault simulation model

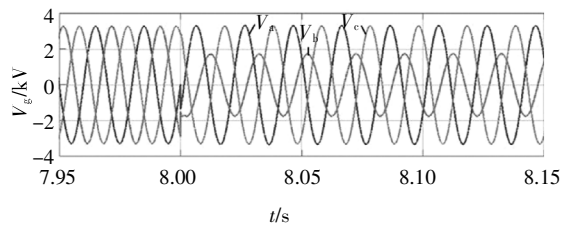
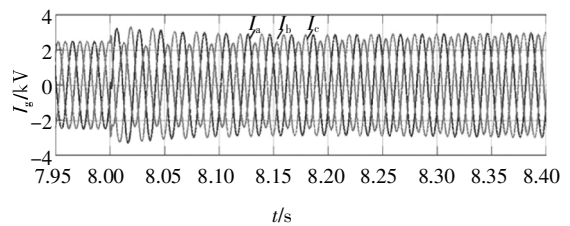


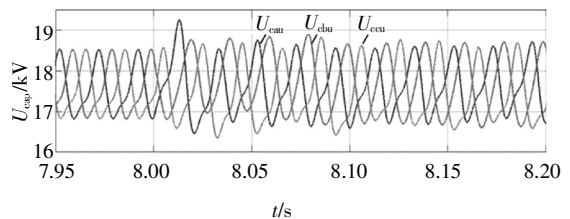
图11 交流侧故障下的交流侧三相电压

Fig.11 AC voltage under AC side fault

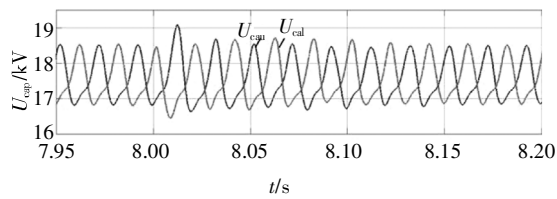
交流侧故障下,传统直接抑制负序电流的方法和 MMC 能量平衡控制方法的仿真结果如图 12 和 13 所示.



(a)交流侧三相电流



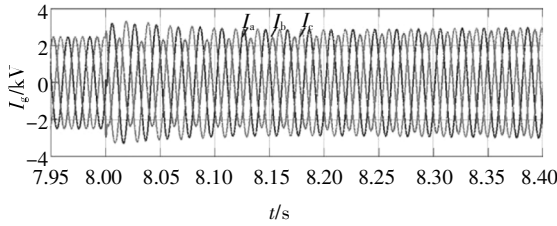
(b)各相上桥臂子模块电容电压平均值



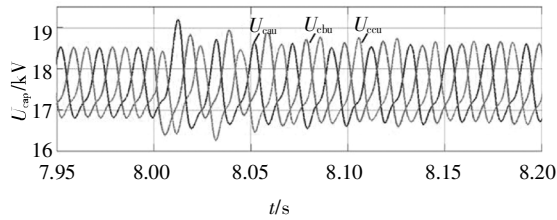
(c)a 相上下桥臂电容电压平均值

图 12 仿真结果(直接抑制负序电流)

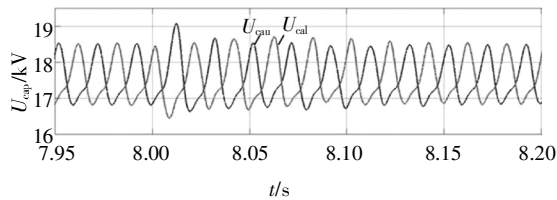
Fig.12 Simulation results(suppress negative sequence current)



(a)交流侧三相电流



(b)各相上桥臂子模块电容电压平均值



(c)a 相上下桥臂电容电压平均值

图 13 仿真结果(本文提出方法)

Fig.13 Simulation results(proposed method)

图 12(a)和 13(a)分别对应 2 种不同控制策略下的交流侧三相电流波形,在 $t = 8\text{ s}$ 时,交流侧发生故障,并引起交流侧三相产生波动,采用的两种控制方法均能在故障发生后使得交流侧三相电流对称。

图 12(b)为采用直接抑制负序电流方法的各相上桥臂子模块电容电压平均值,可以明显看出 b 相桥臂电容电压平均值明显高于其余两相且持续上升。分析如下:由图 11 可知,交流侧三相电压存在关系 $v_s^b < v_s^a = v_s^c$, 通过抑制负序电流使得交流侧三相电流对称,可以推出 $P_{b,s} < P_{a,s} = P_{c,s}$, 由于采用该方法时,直流母线电流分量在 MMC 各相均匀分布即 $P_{b,s} = P_{a,s} = P_{c,s}$, 此时直流侧输入到换流器 b 相的功率 $P_{b,dc}$ 大于换流器输出到交流侧 b 相的功率 $P_{b,s}$ (该模型为逆变端), 多余的功率则储存在 b 相桥臂各子模

块电容内,引起 b 相子模块电容电压不断上升,从而导致换流器内部能量失衡,甚至造成器件的损坏。

图 13(b)为采用本文所提出方法的各相上桥臂子模块电容电压平均值,在 $t = 8\text{ s}$ 时,MMC 各相桥臂电容电压平均值由于交流侧故障发生波动,但很快就恢复稳定,各相子模块电容电压平均值保持对称,验证了基于能量平衡控制的调节直流母线功率分布方法的优越性。

图 12(c)和 13(c)分别为 2 种不同控制策略下的 a 相上下桥臂电容电压平均值的波形,可以发现桥臂电容电压平均值波形在 $t = 8\text{ s}$ 发生波动后恢复稳定,由于理想模型的仿真并未模拟出器件损耗,因此 2 种方法的上下桥臂电容电压在经过短时间的暂态过程后都能恢复稳态。

综上所述,本文所提出的交流侧故障下 MMC-HVDC 的能量平衡控制策略与传统直接抑制负序电流的方法均能控制交流侧三相电流对称,但直接抑制负序电流的方法无法实现对换流器内部的控制,而基于能量平衡控制的方法可以兼顾换流器内部和外部,实现 MMC 交流三相电流以及内部各桥臂能量的协同控制。

5 结论

考虑到交流侧不对称故障时,以交流侧三相电流平衡为控制目标的 MMC 内部出现的有功功率分配不合理而导致的各桥臂能量不平衡的问题,本文提出了一种基于能量平衡原理的 MMC-HVDC 控制策略,通过优化控制 MMC 各桥臂电流分量来调节换流器桥臂间的功率流向,实现了 MMC 交流侧三相电流以及内部各桥臂能量的有效控制。主要结论如下:

1)通过桥臂电流的各电流分量对换流器内部各桥臂间能量流动影响的分析可知, $i_{0,dc}$ 与换流器和直流侧的总功率交换直接相关, $i_{\alpha_add_dc}$ 、 $i_{\beta_add_dc}$ 共同控制换流器内部各相间的功率交换,而 MMC 上下桥臂的能量平衡可通过调节换流器桥臂电流的交流环流分量 i_{k_cir} 来实现。

2)基于上述分析结果,本文采用直接桥臂电流反馈控制,维持各桥臂间的能量平衡,实现了换流器内部、外部的协同控制,交流侧对称和不对称情况下均能在保证交流侧三相电流对称的同时,有效减小子模块平均电容电压波动,通过仿真对比,本文所提控制策略相较于传统的直接抑制负序电流方法更具

优越性。

本文是在 MMC 内部各电容均相等的理想情况下进行的研究,但在实际工程中,考虑到各电容器件参数不可能完全一致,该方法的控制效果将会受到一定影响。因此,下一步工作将考虑各电容参数之间的差异,通过增加一个校正回路来消除这部分影响。

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.
TANG G F, HE Z Y, PANG H. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37 (15): 3—14. (In Chinese)
- [2] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 适用于电压源换流器型高压直流输电的模块化多电平换流器最新研究进展 [J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1243—1252.
WEI Y F, WEI Z N, SUN G Q, *et al.* New prospects of modular multilevel converter applied to voltage source converter high voltage direct current transmission [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1243—1252. (In Chinese)
- [3] TEEUWSEN S P. Modeling the transbay cable project as voltage-sourced converter with modular multilevel converter design [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2011:1—8.
- [4] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulse width-modulated modular multilevel converters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7):1737—1746.
- [5] 夏向阳,周云,帅智康. 高压直流输电系统中模块化多电平换流器的重复预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1637—1643.
XIA X Y, ZHOU Y, SHUAI Z K. Repeat predictive control of a modular multilevel converter for HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7):1637—1643. (In Chinese)
- [6] 孔明,汤广福,贺之渊,等. 不对称交流电网下 MMC-HVDC 输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):41—49.
KONG M, TANG G F, HE Z Y, *et al.* A control strategy for modular multilevel converter based HVDC of unbalanced AC systems [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(28):41—49. (In Chinese)
- [7] 周月宾,江道灼,胡鹏飞,等. 一种 MMC-HVDC 的直流电压波动抑制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27):36—43.
ZHOU Y B, JIANG D Z, HU P F, *et al.* A new approach for suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(27):36—43. (In Chinese)
- [8] 梁营玉,张涛,刘建政,等. 不平衡电网电压下模块化多电平换流器的环流抑制策略 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(9):120—128.
LIANG Y Y, ZHANG T, LIU J Z, *et al.* A circulating current suppressing method for modular multilevel converter under unbalanced grid voltage [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2016, 31(9): 120—128. (In Chinese)
- [9] TU Q R, XU Z, XU L. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3):2009—2017.
- [10] QIN J C, SAEEDIFARD M. Predictive control of a modular multilevel converter for a back-to-back HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1538—1547.
- [11] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with dc-short circuit current limitation [C]//2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE&ECCE). Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425—1431.
- [12] 周月宾,江道灼,郭捷,等. 交流系统不对称时模块化多电平换流器的控制[J]. 电网技术, 2013, 37(3):622—628.
ZHOU Y B, JIANG D Z, GUO J, *et al.* Control of modular multilevel converter under imbalance of AC power system [J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 622—628. (In Chinese)
- [13] ZHANG M, HUANG L, YAO W X, *et al.* Circulating harmonic current elimination of a CPS-PWM-Based modular multilevel converter with a plug-in repetitive controller [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4):2083—2097.
- [14] PRIETO-ARAUJO E, JUNYENT-FERRÉ A, COLLADOS-RODRÍGUEZ C, *et al.* Control design of modular multilevel converters in normal and AC fault conditions for HVDC grids [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152: 424—437.
- [15] PRIETO-ARAUJO E, JUNYENT-FERRÉ A, CLARIANA-COLET G, *et al.* Control of modular multilevel converters under singular unbalanced voltage conditions with equal positive and negative sequence components [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3):2131—2141.
- [16] 王广柱,孙常鹏,刘汝峰,等. 基于桥臂电流控制的模块化多电平变换器综合控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 458—464.
WANG G Z, SUN C P, LIU R F, *et al.* Modular multilevel converter control strategy based on arm current control [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 458—464. (In Chinese)
- [17] 李国庆,辛业春,吴学光. 模块化多电平换流器桥臂电流分析及其环流抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 62—67.
LI G Q, XIN Y C, WU X G. Arm current analysis of modular multilevel converter and its circulating current suppressing method [J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(24): 62—67. (In Chinese)
- [18] 王广柱. 模块化多电平换流器桥臂电流直接控制方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15):35—39.
WANG G Z. An arm current direct control scheme for modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power System, 2013, 37(15): 35—39. (In Chinese)
- [19] OU Z J, WANG G Z, ZHANG L. Modular multilevel converter control strategy based on arm current control under unbalanced grid condition [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3826—3836.
- [20] 欧朱建,王广柱. 电网电压不对称工况下模块化多电平变换器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 258—265.
OU Z J, WANG G Z. Modular multilevel converter control strategy based on arm current control under unbalanced grid condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 258—265. (In Chinese)