

模块化多电平换流器直流输电控制策略

张建坡¹, 田新成², 尹秀艳²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071001;

2. 国网唐山供电公司, 河北 唐山 063000)

摘要: 模块化多电平换流器高压直流输电(MMC-HVDC)系统的控制策略及电流内环控制器对其故障时的运行特性有着重要影响。设计了电网电压不平衡下负序电流抑制策略和对应的限流环节。为解决正负双序同步旋转坐标下电流序分量分解和控制器较多问题, 构建了基于比例积分和谐振控制的混合电流矢量控制。此外为降低桥臂环流对系统运行的影响, 在分析桥臂电流构成成分的基础上, 针对环流序分量 2 倍频特点设计了桥臂环流抑制器。仿真结果表明混合电流矢量控制能够实现直流和 2 倍频交流电流信号的统一控制, 达到了负序电流和桥臂环流的抑制效果。

关键词: 模块化多电平换流器; 高压直流输电; 混合电流矢量控制; 桥臂环流

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.016

0 引言

模块化多电平换流器(MMC)作为应用于电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)领域的一种极具潜能的新型拓扑, 与传统两电平或三电平电压源换流器(VSC)不同, 通过子模块串联构成每相换流桥臂, 避免了两电平开关器件直接串联所带来的动态均压问题。同时模块化结构使其可扩展性更强, 在电平数足够高时, 其输出电压谐波含量更少^[15]。由于具有上述优点, 其在风电场并网、无源网络供电等领域具有更广阔的应用前景。

MMC 控制性能在很大程度上取决于电流内环指令信号获取速度、精度以及控制器输出电流控制策略, 因此内环控制器设计成为关键。常用的电流内环控制器有无差拍控制、幅相控制、比例积分(PI)控制和比例谐振(PR)控制等。无差拍控制具有动态响应快、易于计算机执行的特点, 但其对系统参数的依赖性较大, 鲁棒性较差, 瞬态响应超调大^[6-7]。幅相控制属于间接电流控制, 通过控制换流器侧电压的幅值和相位来控制交流电流, 由于没有引入交流电流反馈量, 电流稳态误差大, 动态响应速度慢, 同时对于系统参数变化过于敏感^[8-9]。PI 控制具有算法简单和可靠性高的特点, 但只能对直流信号实现无静差跟踪, 在电网电压发生不平衡故障时, 为抑制负序电流, 只能在正负双序 dq 坐标下采用 4 个 PI 控制器分别控制。PR 控制器能够有效跟踪控制交流信号, 文献[10-12]利用 PR 控制器在两相静止坐标系下实现了正负序电流的统一控制, 虽然减少了控制器个数和避免了电流序分量分解, 但仍然需要 dq 坐标和 $\alpha\beta$ 坐标间电流指令的相互转化。

电容电压波动和 MMC 工作原理带来了桥臂环流问题, 环流存在对其有效运行带来了不利的影响, 因此成为 MMC 控制必须解决的问题之一。文献[13]分析了上下桥臂电阻、电感参数不对称情况下桥臂环流分量的频率特性, 为环流抑制提供了一定的参考价值。文献[14]通过增加桥臂电抗的方式在一定程度上减少了桥臂环流。文献[15]根据桥臂环流的 2 倍频特性, 利用桥臂滤波器实现了环流的有效抑制。但上述方法都是被动地减少了桥臂环流。文献[16]在分析环流 2 倍频特性的基础上, 在负序旋转坐标下利用 PI 控制实现了环流的有效控制, 但是对于不平衡故障时正序和零序环流分量不能够实现抑制。文献[17-18]分别利用 PR 控制器和比例积分和谐振(PI+R)控制器实现了环流序分量的统一控制, 但是由于需要高通滤波器分解环流分量, 从而对其控制性能带来一定的影响。为了解决高通滤波问题, 文献[19]利用低通滤波和 PR 控制器实现了环流的有效抑制。

无论是正负双序 PI 控制还是 PR 控制, 其目的都是为了解决负序电流对系统运行的影响问题。比例积分和谐振控制器在并网逆变器中表现出良好的控制性能, 得到了广泛的研究和应用^[20-22]。考虑到故障期间电流中的直流分量和 2 次谐波分量, 为避免双序电流矢量控制带来的控制复杂性问题, 本文构建了基于比例积分和谐振控制的混合电流矢量控制 HCVC(Hybrid Current Vector Control), 并将其应用到电网电压不平衡下网侧电流和桥臂环流序分量控制, 从而有效消除了电流内环控制误差, 同时也避免了电流序分量的分解。

1 MMC-HVDC 电路模型

图 1 为 MMC 电路拓扑, 每相桥臂由若干个子模

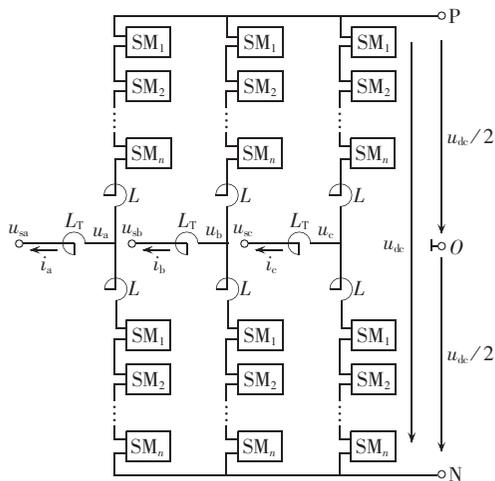


图 1 MMC 等效电路拓扑

Fig.1 Topology of MMC equivalent circuit

块 SM(Sub Module) 构成。 L 为桥臂电抗; L_T 为变压器等效电抗; P 和 N 分别为换流器直流侧正、负极母线,对于参考中性点 O 电位分别为 $u_{dc}/2$ 和 $-u_{dc}/2$ 。

在 abc 三相坐标系下,系统电压 u_{sj} 和阀侧电压 u_j 关系方程如式(1)所示,其中 $j \in (a, b, c)$ 。

$$(0.5L + L_T) di_j / dt = u_{sj} - u_j \quad (1)$$

为了方便控制器设计,提高控制性能,对式(1)进行 Park 变换,转换为如式(2)所示 dq 坐标下数学模型。

$$\begin{cases} (0.5L + L_T) di_d / dt = u_{sd} - u_d + \omega(0.5L + L_T) i_q \\ (0.5L + L_T) di_q / dt = u_{sq} - u_q - \omega(0.5L + L_T) i_d \end{cases} \quad (2)$$

2 电网不平衡故障影响分析

对于交流系统侧,电网电压不平衡下功率方程如式(3)所示,其中有功恒定分量 P_0 和无功恒定分量 Q_0 如式(4)所示。不同于平衡状态,有功和无功率出现了 2 倍频波动分量,其正弦、余弦有功和无功率分量波动幅值分别为 P_s, P_c, Q_s, Q_c 。

$$\begin{cases} P = P_0 + P_c \cos(2\omega t) + P_s \sin(2\omega t + \theta) \\ Q = Q_0 + Q_c \cos(2\omega t) + Q_s \sin(2\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_0 = u_{sd+} i_{d+} + u_{sq+} i_{q+} + u_{sd-} i_{d-} + u_{sq-} i_{q-} \\ Q_0 = u_{sd+} i_{q+} + u_{sq+} i_{d+} + u_{sd-} i_{q-} + u_{sq-} i_{d-} \end{cases} \quad (4)$$

负序电流造成了交流系统侧三相电流的不对称,当电流幅值较低时,可能会导致换流站保护动作,从而系统停运,较为严重时,还会烧毁换流器件^[23];同时从式(4)可以看出,负序电流还与正序电压相互作用,增加了功率的波动。

图 2 是 MMC 单相桥臂等效电路。MMC 通过不断调整上、下桥臂投入子模块个数,改变桥臂电压 u_{j1} 、 u_{j2} (其中下标 1、2 分别表示上、下桥臂),从而叠加出所需输出交流电压。由于储能电容分布于不同子模块中,彼此独立,因此电容充放电时间、损耗和参数的不同会造成电容电压差异,从而导致桥臂电压波

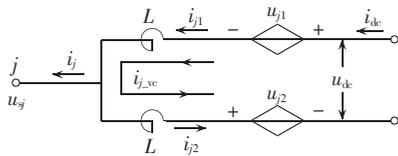


图 2 单相桥臂等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of single-phase leg

动,进而引起桥臂环流问题。

在理想情况下,由于桥臂电气参数一致性和物理结构对称性,交流电流在上、下桥臂进行均衡分流。在未考虑桥臂环流时,上、下桥臂电流 i_{j1} 、 i_{j2} 和交流侧电流 i_j 关系如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_{j1} = 0.5i_j \\ i_{j2} = -0.5i_j \end{cases} \quad (5)$$

定义流经桥臂虚拟电流为 $i_{j,vc}$ 。忽略桥臂功率损耗,根据功率守恒定理, j 相交流侧输入功率等于 j 相桥臂从直流侧获得的功率,如式(6)所示。

$$U_{dc} i_{j,vc} = u_{sj} i_j \quad (6)$$

令 $u_{sj} = U_m \sin(\omega t + \theta)$, $i_j = I_m \sin(\omega t)$, 交流侧功率为:

$$\begin{aligned} u_{sj} i_j &= U_m \sin(\omega t + \theta) \times I_m \sin(\omega t) = \\ &0.5 U_m I_m \cos \theta - 0.5 U_m I_m \cos(2\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),则桥臂虚拟电流为式(8),

其中 $\alpha = U_m / U_{dc}$ 。

$$\begin{aligned} i_{j,vc} &= \{0.5 U_m I_m [\cos \theta - \cos(2\omega t + \theta)]\} / U_{dc} = \\ &0.5 \alpha I_m \cos \theta - 0.5 \alpha I_m \cos(2\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (8)$$

根据 $3 U_m I_m \cos \theta = 2 U_{dc} i_{dc}$, 则虚拟电流整理为:

$$i_{j,vc} = i_{dc} / 3 - 0.5 \alpha I_m \cos(2\omega t + \theta) \quad (9)$$

从式(9)可以看出,桥臂虚拟电流中含有直流分量和 2 次谐波分量。其中直流分量与系统传输有功功率有关,而 2 次谐波分量只存在于桥臂中,对直流侧和交流侧电流没有影响,故定义为桥臂环流。环流不仅使正弦桥臂电流发生畸变,增大了开关器件电流容量,而且还增加了不必要的损耗。

根据叠加定理,考虑桥臂中基频交流分量,此时桥臂电流及其各分量关系修正为式(10)。

$$\begin{cases} i_{j1} = 0.5i_j + i_{dc}/3 - 0.5\alpha I_m \cos(2\omega t + \theta) \\ i_{j2} = -0.5i_j + i_{dc}/3 - 0.5\alpha I_m \cos(2\omega t + \theta) \end{cases} \quad (10)$$

3 控制系统分析与设计

MMC-HVDC 系统在正负双序 dq 坐标系下数学模型为式(11)所示^[22-24],其中下标正、负符号分别代表电压电流正、负序 dq 坐标下序分量。

$$\begin{cases} (0.5L + L_T) di_{d\pm} / dt = u_{sd\pm} - u_{d\pm} + \omega(0.5L + L_T) i_{q\pm} \\ (0.5L + L_T) di_{q\pm} / dt = u_{sq\pm} - u_{q\pm} - \omega(0.5L + L_T) i_{d\pm} \end{cases} \quad (11)$$

为抑制负序电流,保持电流对称,令式(4)中 $i_{d-} = 0$ 、 $i_{q-} = 0$,由式(12)可以求得正序电流指令^[23-25],其中 P^* 、 Q^* 分别为有功和无功率参考值。

$$\begin{cases} I_{d+}^* = P^* \frac{u_{sd+}}{u_{sd+}^2 + u_{sq+}^2} - Q^* \frac{u_{sq+}}{u_{sd+}^2 + u_{sq+}^2} \\ I_{q+}^* = P^* \frac{u_{sq+}}{u_{sd+}^2 + u_{sq+}^2} + Q^* \frac{u_{sd+}}{u_{sd+}^2 + u_{sq+}^2} \end{cases} \quad (12)$$

图 3 为负序双序 dq 坐标下 PI 控制框图。

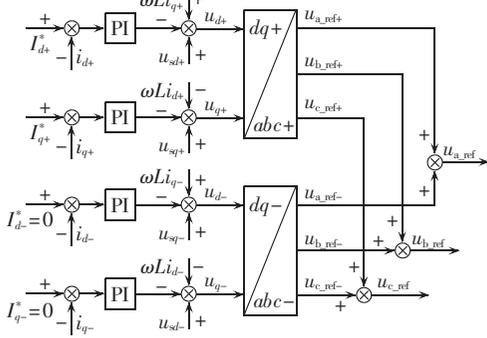


图 3 正负双序 PI 控制结构

Fig.3 Structure of PI control for positive and negative sequences

为了实现正负序电流独立控制,需要电流序分量的分解。在实际应用中,因采样频率及电网频率变化、锁相环性能等因素会造成正负序分量分解误差,使得正负序分量控制相互影响,控制性能变差,控制结构也稍显复杂^[12]。

由于在单一 dq 坐标系下,2 倍频交流信号仅存在于故障期间,而谐振控制器可以实现交流信号跟踪控制,其网络函数如式(13)所示,其中 K_R 为谐振系数, ω_0 为谐振频率。

$$G_R(s) = 2K_R s / (s^2 + \omega_0^2) \quad (13)$$

当 $s=0 \text{ rad/s}$ 时, $G_R(0)$ 模值为零,对直流信号控制无影响;而当 $s=200 \pi \text{ rad/s}$, 此时 $G_R(200 \pi) = \infty$, 能够实现 2 倍频交流信号跟踪。综上考虑,本文利用比例积分+谐振的 HCVC,从而充分利用 PI 内环电流控制带宽大、速度快的优点和谐振控制能够无差跟踪交流信号的特点。HCVC 原理结构如图 4 所示。HCVC 控制器特性方程如式(14)所示。

$$G_{PR}(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + \frac{K_R s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (14)$$

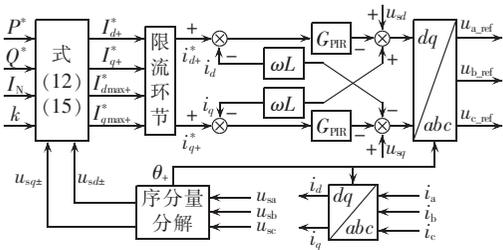


图 4 HCVC 原理结构

Fig.4 Schematic structure of HCVC

故障期间往往伴随着电压降落和电流升高问题,为了避免系统过流,设计了过流限制环节。根据系统额定容量和额定电压求得额定电流 I_N , 考虑 k 倍

过载系数和电压不平衡度影响,则得到式(15)所示限流值,其中 λ 为功率因数。

$$\begin{bmatrix} I_{d\max+}^* \\ I_{q\max+}^* \end{bmatrix} = \frac{kI_N \sqrt{u_{sd+}^2 + u_{sq+}^2}}{\sqrt{u_{sd+}^2 + u_{sq+}^2 + u_{sd-}^2 + u_{sq-}^2}} \begin{bmatrix} \lambda \\ \sqrt{1-\lambda^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据式(16),桥臂平均电流中含有直流分量和环流分量,因此同样可以利用 HCVC 实现。对桥臂平均电流低通滤波,则得到直流分量 $i_{j,dc}$, 将其作为 HCVC 参考指令,得到如图 5 所示控制框图,其中 $u_{j,unb}$ 为桥臂环流抑制信号。虽然在电网电压不平衡故障时,桥臂环流中将含有正序和零序分量,但其频率仍然为 2 倍基频。

$$i_{j,avg} = \frac{i_{j1} + i_{j2}}{2} = i_{j,dc} - \frac{\alpha I_m \cos(2\omega t + \theta)}{2} \quad (16)$$

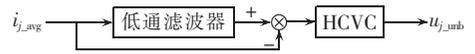


图 5 环流抑制原理框图

Fig.5 Block diagram of circulating current suppression

将环流抑制信号叠加到电压参考信号,得到图 6 所示基于载波移相调制(CPS-SPWM)的 j 相上桥臂和下桥臂中 N 个子模块的触发脉冲生成原理图。

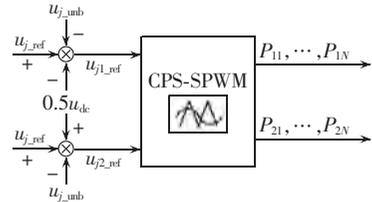


图 6 触发脉冲生成框图

Fig.6 Block diagram of trigger pulse generation

4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 搭建了 MMC-HVDC 仿真模型,如图 7 所示。两侧交流电源电压额定值为 110 kV, 直流电压 $U_{dc}=400 \text{ kV}$, 系统容量为 $450 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。考虑到实际运行中调制度 m 取值一般在 0.8~0.9 之间,根据阀侧交流电压幅值与直流电压关系 $U_m=0.5mU_{dc}$, 当换流变压器变比为 110/210 时,调制度为 0.855, 比较合理。每相桥臂有 20 个子模块串联,电平数为 21 电平。子模块电容值为 3 mF,桥臂电抗器电感值为 40 mH。采用文献[26]中的基于载波移相的调制策略和电容电压均衡策略,分别对 PI 控制和 HCVC 性能进行了仿真分析。

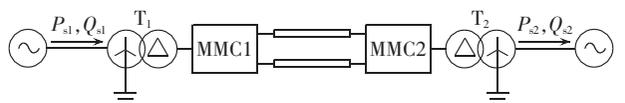


图 7 MMC-HVDC 仿真模型

Fig.7 Simulation model of MMC-HVDC

4.1 跟随特性仿真分析

MMC2 侧无功功率定值在 2.5 s 时由 100 Mvar 跃变到 -200 Mvar, 3.5 s 时跃变到 100 Mvar; 有功功率在 2 s 时从 400 MW 跃变为 200 MW, 3 s 时从 200 MW 跃变为 -400 MW。仿真结果如图 8 和图 9 所示。

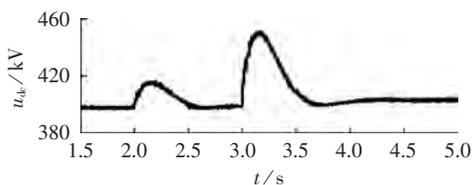
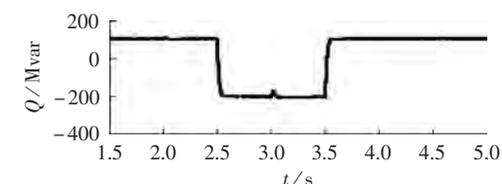
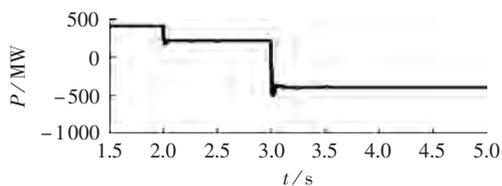


图 8 直流母线电压

Fig.8 Waveforms of DC bus voltage



(a) 无功功率



(b) 有功功率

图 9 有功和无功功率波形

Fig.9 Waveforms of active and reactive powers

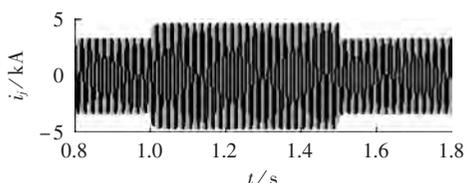
直流母线电压的稳定是保证高压直流输电系统正常工作的关键。从图 8 和图 9 可以看出, 无功功率变化时, 对直流母线电压影响较小, 而有功功率变化时, 会造成直流母线电压波动。由于 MMC2 在 3 s 前工作于逆变状态, 此时 MMC2 从 MMC1 吸收电能, 在 3 s 时有功功率从 200 MW 阶跃到 -400 MW (从逆变状态变为整流状态即从吸收转换为提供功率)。因为 MMC2 侧功率阶跃 600 MW, 而 MMC1 侧采用了定直流电压控制, 输出功率短时间内不能够跟踪输出, 从而造成两端系统功率暂时不平衡, 此部分不平衡功率会转移到作为储能元件的电容中, 从而造成直流母线电压暂态尖峰比较大, 但是在定直流电压控制下, 母线电压最终恢复为正常值, 系统表现出较好的定电压能力。

从图 9 可以看出, 在 PI 控制和 HCVC 下, 无功和有功功率输出都能较好地跟随指令变化。在有功发生变化的时候, 由于直流母线电压波动, 会造成阀侧交流电压波动从而影响到无功输出, 而由于有功和无功功率独立控制, 无功变化影响不到有功, 故对直流母线电压的影响很小。

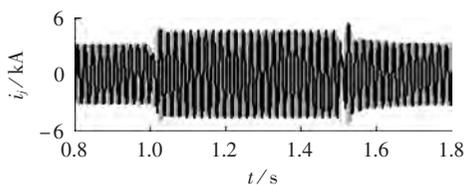
以上仿真表明, 在电网电压正常时, 由于没有谐波分量, HCVC 本质上就是 PI 控制, 因此控制特性没有本质区别, 有功和无功功率输出都能很好地跟随系统指令, 表现出较好的跟随性和解耦性。

4.2 负序电流抑制分析

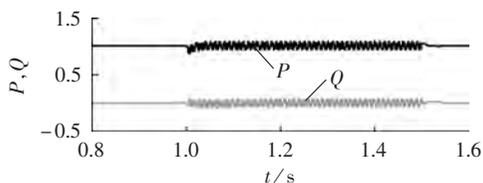
图 10 为负序电流抑制波形 (其中功率为标幺值)。从仿真图 10(a)、(b) 中可以看出, HCVC 和 PI 控制都实现了相应控制目标, 达到了负序电流抑制目的。但是在故障期间, 由于 PI 控制需要引入负序电流控制环节, 涉及指令切换以及电流序分量分解带来的问题, 从而造成切换瞬间扰动较大。而 HCVC 由于不需要控制切换, 在单一 dq 坐标下, 对交直混合电流能够进行统一控制, 因此控制效果较好。在图 10(c)、(d) 中, 由于正序电流与负序电压作用, 功率波动依然存在。



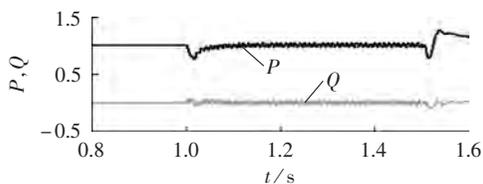
(a) HCVC 下交流电流



(b) PI 控制下交流电流



(c) HCVC 下功率



(d) PI 控制下功率

图 10 负序电流抑制波形

Fig.10 Waveforms of negative-sequence current suppression

4.3 环流抑制分析

图 11 为环流抑制波形。从图 11(a)、(b) 可以看出, 1.2 s 前由于环流抑制器没有启动, 所以桥臂平均电流较大, 且含有环流波动分量, 1.2 s 后, 环流分量得到了有效抑制。当电网电压发生不平衡故障时, 由于在负序电流控制策略下三相桥臂能量的不平衡分配, 也导致了三相桥臂电流平均分量的差异。

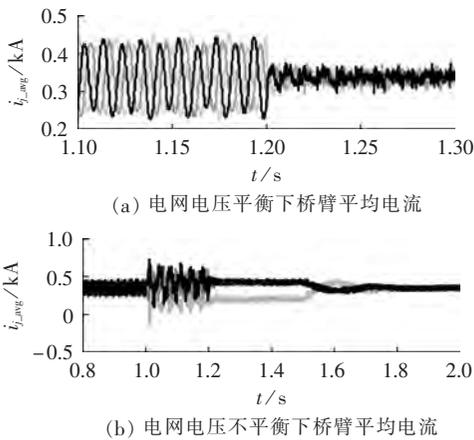


图 11 环流抑制波形

Fig.11 Waveforms of circulating current suppression

5 结论

本文在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 21 电平 MMC-HVDC 双端仿真模型,在此基础上对 MMC-HVDC 正负双序 PI 和 HCVC 稳态、暂态控制策略进行了研究与仿真验证,得出如下结论。

a. 在稳态控制过程中,由于在同步旋转坐标下没有交流分量,HCVC 和 PI 控制表现出相同的控制性能;但是在故障时,由于 HCVC 能够实现交直混合电流统一控制,从而避免了电流序分量分解和传统 PR 控制不同坐标下的指令转换问题。

b. 从能量守恒角度对桥臂输入输出功率进行了分析,得出了桥臂电流中直流分量、环流分量和基波分量之间的数量关系,并指出电网电压不平衡下环流正负零序分量的 2 倍频特性。通过将 HCVC 引入环流控制,实现了桥臂环流分量的有效统一抑制,避免了环流控制中的高通滤波问题。

参考文献:

[1] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-10.
XU Zheng,CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1):1-10.

[2] 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.

[3] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-38.
ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. The research of direct current side fault characters of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-38.

[4] GEMMELL B,DORN J,RETZMANN D,et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission[C]//Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Chicago,USA:IEEE,2008:1-16.

[5] 张建坡,赵成勇. 基于电压源换流器型直流输电拓扑结构和调制策略[J]. 电网技术,2012,36(6):256-261.
ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. Research on topological structure and control strategy for voltage source converter-based direct current power transmission[J]. Power System Technology,2012,36(6):256-261.

[6] 高吉磊,黄先进,林飞,等. 基于重复观测器的 PWM 整流器无差拍控制[J]. 电工技术学报,2010,25(6):48-54.
GAO Jilei,HUANG Xianjin,LIN Fei,et al. Deadbeat control strategy for PWM rectifiers based on repetitive observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(6):48-54.

[7] 杨勇,阮毅,叶斌英,等. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(33):40-46.
YANG Yong,RUAN Yi,YE Binying,et al. Deadbeat predictive current control method for three-phase grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(33):40-46.

[8] 张桂斌,徐政,王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及非线性控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):17-22.
ZHANG Guibin,XU Zheng,WANG Guangzhu. Steady state and steady model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(1):17-22.

[9] 王冠,蔡晔,张桂斌,等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术,2003,27(2):4-8.
WANG Guan,CAI Ye,ZHANG Guibin,et al. Equivalent model of HVDC-VSC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology,2003,27(2):4-8.

[10] HU Pengfei,JIANG Daozhuo,ZHOU Yuebin,et al. Study of the proportional resonant control based modular multilevel converter [C]//Proceedings of the Digital Manufacturing and Automation. Guilin,China:[s.n.],2012:810-813.

[11] ZHOU Yuebin,JIANG Daozhuo,GUO Jie,et al. Control of modular multilevel converter based on stationary frame under unbalanced AC system[C]//Proceedings of the Digital Manufacturing and Automation. Guilin,China:[s.n.],2012:293-296.

[12] 魏晓云,孙辉,魏晓光,等. 改善电能质量的电压源换流器高压直流输电不平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报,2011,31(9):8-14.
WEI Xiaoyun,SUN Hui,WEI Xiaoguang,et al. Control strategy about power quality improvement for VSC-HVDC under unbalanced AC grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(9):8-14.

[13] 韩少华,梅军,郑建勇,等. 模块化多电平换流器不对称桥臂的环流稳态分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):38-42.
HAN Shaohua,MEI Jun,ZHENG Jianyong,et al. Steady-state analysis of unsymmetrical MMC bridge-arm circulating current[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):38-42.

[14] 谢妍,陈柏超,陈耀军,等. 新型模块化多电平换流器串联电抗器的功能与取值分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):55-59.
XIE Yan,CHEN Baichao,CHEN Yaojun,et al. Function analysis and parameter selection for series reactor of modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):55-59.

[15] JACOBSON B,KARLSSON P,ASPLUND G,et al. VSC-HVDC transmission with cascaded two-level converters[R]. Paris,France: Cigré Session,2010.

[16] 屠卿瑞,徐政,管敏渊,等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J]. 电力系统自动化,2010,34(18):57-61,83.
TU Qingrui,XU Zheng,GUAN Minyuan,et al. Design of circulating

- current suppressing controllers for modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (18): 57-61, 83.
- [17] ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Analysis and control of modular multilevel converters under unbalanced conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 1986-1995.
- [18] 阎友友, 汤广福, 贺之渊, 等. 一种适用于模块化多电平换流器的新型环流控制器 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 104-109. YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. A novel circulating current controller for modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 104-109.
- [19] LI Shaohua, WANG Xiuli, YAO Zhiqing, et al. Circulating current suppressing strategy for MMC-HVDC based on nonideal proportional resonant controllers under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 387-397.
- [20] 黄守道, 肖磊, 黄科元, 等. 不对称电网故障下直驱型永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 173-180. HUANG Shoudao, XIAO Lei, HUANG Keyuan, et al. Operation and control on the grid-side converter of the directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during asymmetrical faults [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 173-180.
- [21] 张祿, 金新民, 唐芬, 等. 电网电压对称跌落下的双馈感应发电机 PI-R 控制及改进 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 106-117. ZHANG Lu, JIN Xinmin, TANG Fen, et al. Improved PI-R control for doubly fed induction generators under grid voltage symmetrical dip [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 106-117.
- [22] 肖磊, 黄守道, 黄科元, 等. 直驱型永磁同步风力发电机侧变流器谐波抑制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 31-37. XIAO Lei, HUANG Shoudao, HUANG Keyuan, et al. Harmonic suppression for the motor-side converter of the directly-driven wind turbine with PM synchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 31-37.
- [23] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 149-150.
- [24] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制 [J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1238-1245. GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Wulue, et al. Analysis and control of modular multilevel converter based HVDC transmission systems during grid faults [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1238-1245.
- [25] GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [26] 赵昕, 赵成勇, 李广凯. 采用波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-55. ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai. Sub module capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-55.

作者简介:



张建坡

张建坡(1973—),男,河北保定人,讲师,博士,主要研究方向为高压直流输电与柔性输配电技术(E-mail: zhangjianpo@126.com);

田新成(1982—),男,河北唐山人,工程师,硕士,从事调度自动化和配电自动化系统工作(E-mail: txc_ncepu@163.com);

尹秀艳(1982—),女,山东临沂人,工程师,硕士,从事电网运营监测工作。

Control strategy of MMC-HVDC

ZHANG Jianpo¹, TIAN Xincheng², YIN Xiuyan²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071001, China;

2. State Grid Tangshan Power Corporation, Tangshan 063000, China)

Abstract: The control strategy and the inner-loop current controller of MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current) transmission system affect greatly its operating performance during a fault. The negative-sequence current suppression strategy in the condition of unbalanced grid voltage and corresponding over-current limiter are designed. A HCVC (Hybrid Current Vector Controller) based on PI and resonance control is constructed to solve the complex problem of current sequence extraction and control in the dq reference frame of positive and negative sequences. Based on the analysis of leg current components and in order to reduce the impact of leg circulating current on system operation, a leg circulating current suppressor is designed according to its feature of double base frequency. The simulative results show that the introduced HCVC control DC and double base frequency AC uniformly, effectively suppressing the negative-sequence current and circulating current.

Key words: modular multilevel converter; HVDC power transmission; hybrid current vector control; leg circulating current