DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.45 **中图分类号**：TM721 **文献标志码**：A

虚拟阻抗+QPR控制的MMC-HVDC环流抑制策略

王君瑞，豆 帅(中国电源学会学生会员)，王 铭
(北方民族大学电气信息工程学院，银川 750000)

摘要：基于模块化多电平换流器的柔性直流 MMC-HVDC(modular multilevel converter-high voltage direct current)输电系统子模块桥臂间环流使桥臂电流发生畸变，影响电容电压的平衡。根据模块化多电平换流器MMC(modular multilevel converter)的电路定理及工作特点，分析出MMC存在二倍频谐波分量和高倍频偶次谐波分量的环流问题。利用陷波器与准比例谐振QPR(quasi-proportional resonant)控制器配合实现对二倍频谐波分量的提取和抑制，并加入虚拟阻抗抑制 MMC 环流中的高倍频偶次谐波分量。该策略同时抑制了二倍频谐波分量和高倍频偶次谐波分量，环流抑制效果明显，适用于MMC-HVDC的环流抑制控制。仿真结果表明，加入虚拟阻抗的QPR控制策略能够有效抑制MMC环流波形、MMC桥臂电流波形和MMC-HVDC交流侧电流的波动幅值。

关键词：环流抑制；陷波器；准比例谐振控制；虚拟阻抗

MMC-HVDC Circulating Current Suppression Strategy Based on Virtual Impedance and QPR Control

WANG Junrui, DOU Shuai, *Student Member*, *CPSS*, WANG Ming
(School of Electrical and Information Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750000, China)

Abstract: The circulating current between the sub-module bridge arms of a modular multilevel converter-high voltage direct current (MMC-HVDC) transmission system distorts the bridge arm current, thus affecting the balance of capacitor voltage. According to the circuit theorem and working characteristics of a modular multilevel converter (MMC), the problem of circulating current in the second harmonic component and the multi-frequency even-order harmonic component of the MMC is analyzed. The extraction and suppression of the second harmonic component are realized by using a notch filter and a quasi-proportional resonant (QPR) controller. The virtual impedance is added to suppress the multi-frequency even-order harmonic component of circulating current in the MMC. The above suppression strategy simultaneously suppresses the second harmonic component and multi-frequency even-order harmonic component, and the effect of circulating current suppression is obvious, indicating that it is suitable for the circulating current suppression control of MMC-HVDC. Simulation results show that the QPR control strategy with virtual impedance can effectively suppress fluctuations in the MMC circulating current waveform, MMC bridge arm current waveform and MMC-HVDC AC-side current.

Keywords: Circulating current suppression; notch filter; quasi-proportional resonant (QPR) control; virtual impedance

收稿日期：2024-09-27；**修回日期**：2024-12-02；**录用日期**：2024-12-14；**网络首发日期**：2024-12-24
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52167004)；宁夏回族自治区智能装备与精密检测技术研究应用创新团队资助项目(2022BSB03104)；北方民族大学创新项目(YCX24115)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52167004; Ningxia Hui Autonomous Region Intelligent Equipment and Precision Detection Technology Research and Application Innovation Team under the grant 2022BSB03104; North Minzu University Innovation Project under the grant YCX24115

模块化多电平换流器MMC(modular multilevel converter)具有模块化设计、电压等级易拓展、电能输送容量大、电能变换效率高、电能质量优等优点，在高压直流输电领域备受青睐[1-4]。然而，

MMC 子模块电容时刻处于充放电过程，使得 MMC 相间能量不能时刻保持相同，导致 MMC 子模块间桥臂出现谐波环流。

文献[5-6]以电流平衡、能量均衡的方式分析桥臂环流的形成机理，为清除环流中的二倍频谐波分量，提出在桥臂调制信号中添加二倍频共模成分；文献[7-8]通过负序旋转坐标变换方法，将二倍频谐波环流分量分解为 2 个直流分量，经比例积分控制器，虽然可以进行环流抑制，但需要坐标变换与前馈解耦环节，增加了控制系统的运算量；文献[9]的比例谐振 PR(proportional resonant)控制器由比例环节和广义积分环节 2 部分组成，在硬件实现时对元器件的参数精度和数字系统精度要求较高，控制器不易实现，且控制器在非基频处增益过小、带宽过窄、抗电网频率扰动能力较差，无法有效抑制谐波；文献[10]结合了准比例谐振 QPR(quasi-proportional resonant)控制器和陷波器，但未考虑高倍频谐波分量，仅抑制了环流中的二倍频谐波分量；文献[11]提出虚拟阻抗和无差拍控制相结合的环流抑制控制策略，实现了环流抑制，但系统多出的一部分电压，导致交流电流畸变严重，输出电压降低；文献[12]提出将 QPR 控制器应用于模块化多电平换流器柔性直流 MMC-HVDC(MMC-high voltage direct current)的控制策略，无需前馈解耦和正负序分解，控制器设计简单，同时给出了一种基于 QPR 控制器可有效抑制二倍频环流的新方法，但该方法并未对多倍频环流进行抑制，桥臂电流畸变程度较高；文献[13]采用多个 PR 控制器抑制了环流中高倍频分量，但在抑制环流的同时，由于控制器数量增加，参数调节难度变大；文献[14]使用一种虚拟阻抗和无差拍预测控制相结合的环流抑制控制策略，实现了环流抑制，但结构复杂。

上述环流抑制策略采用各种抑制器对二倍频环流进行抑制，但对环流高倍频偶次谐波分量的抑制相对较少。针对上述环流二倍频和高倍频问题，在 QPR 抑制二倍频环流的基础上，本文提出加入虚拟阻抗的 QPR 控制的抑制策略。具体设计过程如下：针对二倍频谐波分量，通过陷波器滤除二倍频谐波分量，并将其与初始值作差，得出新的二倍频谐波分量，再通过 QPR 控制器调节，得到二倍频的环流抑制量；针对高倍频偶次谐波分量，在二倍频谐波分量去除后，通过适当调节虚拟电阻和虚拟桥臂电抗，实现虚拟阻抗对高倍频偶次谐波分量的抑制，通过改变虚拟阻抗，得到抑制高倍频偶次谐波的环流抑制量。将上述的二倍频环流抑制量和高倍频环流抑制量相加，即可得到实际环流抑制量，修正桥臂电压参考值后，得到电流内环输出电压。加入虚拟阻抗的 QPR 控制策略原理简单、易于实现。

1. MMC-HVDC 拓扑结构及数学模型

1.1 MMC-HVDC 拓扑结构

图 1 为 MMC-HVDC 并网结构，电网 1 连接整流侧 MMC1 换流器，电网 2 连接逆变侧 MMC2 换流器，直流电缆连接两侧结构相同的 MMC 换流器。图中：U_{s1}、U_{s2} 分别为 MMC-HVDC 系统电网 1 和电网 2 的公共交流母线电压；P_1、Q_1 分别为电网 1 注入 MMC1 的有功功率和无功功率；R_1、R_2 分别为 MMC1、MMC2 换流站变压器的等效电阻；L_1、L_2 分别为 MMC1、MMC2 换流站变压器的等效电感；C_1、C_2 为缓冲 MMC 内部短路时冲击电流直流侧而并联的大电容；U_{dc} 为 MMC-HVDC 直流母线电压；P_2、Q_2 分别为电网 2 注入 MMC2 的有功功率和无功功率。

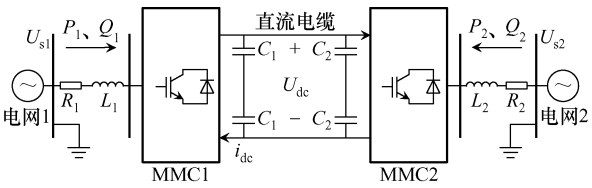


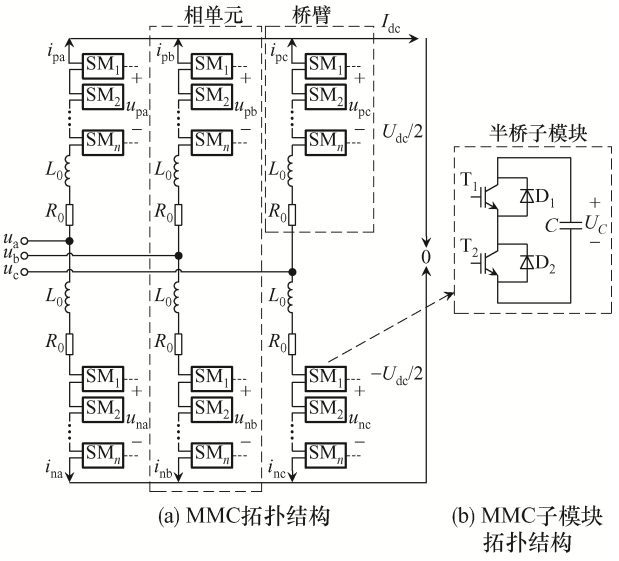
图 1 MMC-HVDC 并网结构

Fig. 1 Grid-connected structure of MMC-HVDC

1.2 MMC 拓扑结构及其数学模型

图 2(a)为 MMC 拓扑结构，单相 MMC 有上、下 2 个桥臂，每个桥臂均有 n 个 MMC 子模块，其结构如图 2(b)所示。图中：u_{pa}、u_{pb}、u_{pc} 分别为 A

相、B 相、C 相上桥臂电压；u_{na}、u_{nb}、u_{nc} 分别为 A 相、B 相、C 相下桥臂电压；T_1、T_2 为绝缘栅双极晶体管 IGBT(insulated gate bipolar transistor)；D_1、D_2 为反并联二极管；C 为直流侧电容；U_C 为电容电压。



(a) MMC拓扑结构　　(b) MMC子模块拓扑结构

图 2　MMC 换流器拓扑结构

Fig. 2 Topology of MMC

任意时刻、任意相单元的子模块投入个数均为 n，因此通过 n 个子模块的电容电压来平衡直流侧电压，即

$$U_{dc}=\sum_{i=1}^{n_{up}}U_{C,i}+\sum_{l=1}^{n_{down}}U_{C,l}\qquad n_{up}=n_{down}=n \tag{1}$$

1.3 MMC-HVDC 数学模型

由于换流器三相单元对称，故可将 MMC-HVDC 系统等效为单相系统。图 3 为单相桥臂等效电路，其中：O^*为交流侧接地中性点；u_j(j=a, b, c)为交流系统 j 相电压；L_s为交流侧等效电感；R 为等效电阻；i_j 为 j 相交流侧电流；u_{pj}、u_{nj} 分别为 j 相的上、下桥臂电压；L_j为 j 相桥臂电感；i_{cirj}为 MMC 的相间环流；i_{pj}、i_{nj}分别为 j 相的上、下桥臂电流；O 为直流侧中性点。

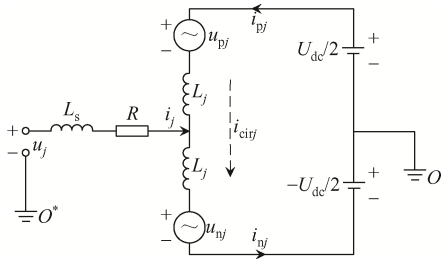


图 3　单相桥臂等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of single-phase bridge arm

以上桥臂为例进行分析，电压电流关系式为

$$u_j=L_s\frac{\mathrm{d}i_j}{\mathrm{d}t}+Ri_j-L_j\frac{\mathrm{d}i_{pj}}{\mathrm{d}t}-u_{pj}+\frac{1}{2}U_{dc} \tag{2}$$

令 $U_Z=L_j\dfrac{\mathrm{d}i_{cir\,j}}{\mathrm{d}t}$，$L=\left(L_s+\dfrac{1}{2}L_j\right)$，其中，$U_Z$ 为 i_{cirj}在 L_j上产生的压降，L 为等效电感，得出

$$u_j=L\frac{\mathrm{d}i_j}{\mathrm{d}t}+Ri_j-U_Z-u_{pj}+\frac{1}{2}U_{dc} \tag{3}$$

由此可得 MMC 简化等效电路，如图 4 所示。图中：u_{sa}、u_{sb}、u_{sc}分别为 A 相、B 相、C 相的电网电压；i_{sa}、i_{sb}、i_{sc}分别为 A 相、B 相、C 相的网侧电流；i_{a1}、i_{b1}、i_{c1}为上桥臂流过的电流；i_{a2}、i_{b2}、i_{c2}为下桥臂流过的电流；u_{ca}、u_{cb}、u_{cc}为 MMC 换流器三相输出电压的基波分量。MMC 通过改变子模块的投切状态来控制桥臂输出电压，因此，u_{a1}、u_{b1}、u_{c1}等效为上桥臂受子模块控制的受控电压源；u_{a2}、u_{b2}、u_{c2} 等效为下桥臂受子模块控制的受控电压源。

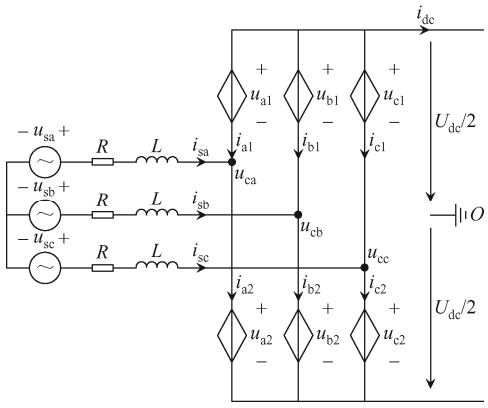


图 4　MMC 简化等效电路

Fig. 4 Simplified equivalent circuit of MMC

根据图 4 的电路结构，建立 MMC-HVDC 系统三相静止坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases}L\dfrac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t}+i_{sa}R=u_{sa}-u_{ca}\\[2ex] L\dfrac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t}+i_{sc}R=u_{sb}-u_{cb}\\[2ex] L\dfrac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}t}+i_{sc}R=u_{sc}-u_{cc}\end{cases} \tag{4}$$

式中，i_a、i_b、i_c分别为 A 相、B 相、C 相网侧电流。将三相静止坐标系中的系统变换到 $\alpha\beta$ 坐标系中，两相静止坐标变换可将式(4)转化为

$$\begin{cases} L\dfrac{\mathrm{d}i_\alpha}{\mathrm{d}t}+Ri_\alpha=u_{s\alpha}-u_{c\alpha} \\ L\dfrac{\mathrm{d}i_\beta}{\mathrm{d}t}+Ri_\beta=u_{s\beta}-u_{c\beta} \end{cases} \tag{5}$$

式中：i_α、i_β分别为交流系统电流转换到 α、β 轴的分量；$u_{s\alpha}$、$u_{s\beta}$分别为三相电压转换到 α、β 轴的分量；$u_{c\alpha}$、$u_{c\beta}$ 分别为换流器输出电压在 α、β 轴的分量。

2. 环流抑制策略

基于负序旋转坐标变换的传统环流抑制方法虽然可以抑制环流，但引入了 2 次旋转坐标变换，且需要相间解耦控制，导致其计算较为复杂。基于此，本文提出一种加入虚拟阻抗的 QPR 控制的环流抑制方法。

2.1 QPR 控制器二倍频谐波分量抑制策略

陷波器是无限冲击响应数字滤波器，其低频滤波特性效果显著，因此本文使用陷波器与 QPR 控制器结合，实现对环流二倍频谐波分量的滤除与跟踪。将初始环流分量与陷波器滤除的二倍频分量作差，校正环流的二倍频谐波分量。陷波器的传递函数为

$$H(s)=\frac{s^2+\omega_n^2}{s^2+\xi\omega_n s+\omega_n^2} \tag{6}$$

式中：s 为拉普拉斯算子；ω_n为陷波器的角频率；ζ为阻尼系数，ζ=1/Q，Q 为陷波器的品质因数。

电网基波频率为 50 Hz，其二倍频谐波频率为 100 Hz，根据角频率与频率的关系，设置 ω_n= 200π rad/s。图 5 为陷波器伯德图，可以明显看出，陷波器的增益大幅度衰减为 ω_n= 200π rad/s 的凹陷波谷处。

陷波器滤除二倍频谐波分量后，对上述环流中的二倍频谐波分量进行抑制。在保持 PR 控制器高增益的基础上，采用易于实现的 QPR 控制器解决 PR 控制器抗扰动能力差、带宽窄等问题。QPR 控制器的传递函数可表示为

$$G(s)=K_p+\frac{2K_r\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2} \tag{7}$$

式中：K_p为比例环节系数；K_r为谐振环节系数；ω_c为截止角频率；ω_0为谐振角频率。

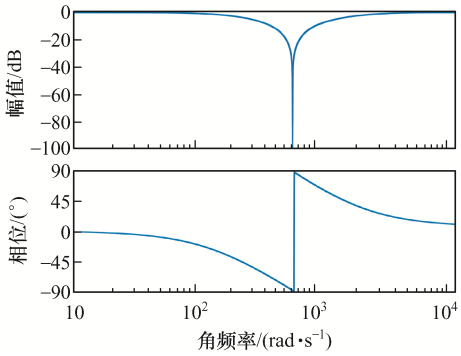


图 5 陷波器伯德图

Fig. 5 Bode diagram of notch filter

将 s=iω 代入式(7)可得

$$G(\mathrm{i}\omega)=K_p+\frac{2K_r\mathrm{i}\omega_c\omega}{-\omega^2+2\mathrm{i}\omega_c\omega+\omega_0^2}=K_p+\frac{K_r}{1+\mathrm{i}(\omega^2-\omega_0^2)/2\omega_c\omega} \tag{8}$$

式中，ω 为输入信号角频率。由式(8)可知，相角位移为 0 时，ω=ω_0，QPR 控制器谐振点处的幅值增益为 K_p+K_r，该增益对系统的动态性能和稳定性均有重要影响，可以进行无静差跟踪指定频率。图 6 为 QPR 控制器伯德图，可以看出，控制器在谐振频率处的增益为 40 dB，同时具有一定的相角裕度，因此可以对谐振频率点信号实现无静差跟踪。

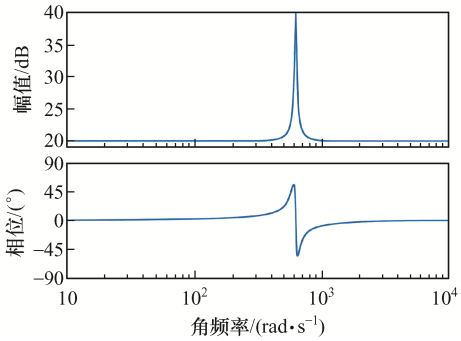


图 6 QPR 控制器伯德图

Fig. 6 Bode diagram of QPR controller

图 7 为 QPR 控制器的抑制策略框图。首先通过 i_{pj} 和 i_{nj} 计算出环流初始值 i_{zj}；然后通过陷波器滤除环流二倍频分量，并将其与 i_{zj} 作差，得到环流的二倍频谐波分量 $i_{zj,2}$；最后，将 $i_{zj,2}$ 与参考值 i_{ref} 作差，该差值经过 QPR 控制器，得到需要的参考电压信号补偿量 $u_{zj,2}$。其中 i_{ref} 的作用是对二倍频环流进行补偿，取值为 0。

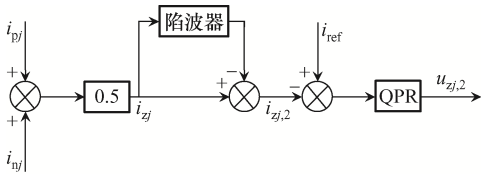


图 7　QPR 控制器抑制策略框图

Fig. 7 Block diagram of suppression strategy for QPR controller

2.2 高频谐波分量抑制策略

环流中除二倍频谐波分量外，还存在少量的高倍频偶次谐波分量，但 QPR 控制器只能对特定的二倍频谐波分量进行环流抑制。因此在 QPR 控制器对二倍频环流抑制的基础上，加入虚拟阻抗环节来实现对桥臂高倍频偶次谐波的抑制。为解决添加虚拟阻抗导致系统多分出的电压使输出电压降低的问题，本文采用的虚拟阻抗仅抑制含量较少的高倍频偶次谐波分量，使虚拟阻抗对系统分压较小。综上，加入虚拟阻抗的 QPR 抑制策略，不仅不会影响输出电压，还能在 QPR 抑制策略上增强环流抑制效果。

并联阻感可以通过调节其等效阻抗来影响系统中的电流分配，尤其在并联逆变器或分布式电源运行中表现良好；且对高频分量的阻抗较大，可有效抑制谐波电流，这使其在减小谐波失真方面具有优势。虚拟阻抗等效电路如图 8(a)所示，其中：L_I 为虚拟桥臂电抗；R_I 为虚拟电阻；$i_{zj,h}$ 为第 j 相环流中的高倍频偶次谐波分量；$u_{zj,h}$ 为第 j 相高倍频环流电压抑制量。

微分环节 Ts 可表示 L_I 的阻抗特性，调节相应的 Ts 可实现对虚拟阻抗的调节。实际过程中纯微分环节不易实现，可在微分环节前加入一阶惯性环节，防止微分环节使系统过调而发散。惯性环节传递函数为

$$G_d(s)=\frac{kTs}{1+Ts} \tag{9}$$

式中：k 为比例增益系数，k=R_I；T 为一阶惯性环节的时间常数，T=L_I/R_I。

将 k=R_I 和 T=L_I/R_I 代入式(9)可得虚拟阻抗的传递函数为

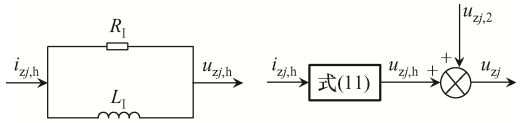
$$Z_v(s)=\frac{R_IL_Is}{R_I+L_Is} \tag{10}$$

环流压降增量与环流关系被修正，产生新的环流抑制量 $u_{zj,h}$，其关系式为

$$u_{zj,h}=i_{zj,h}\frac{R_IL_Is}{R_I+L_Is} \tag{11}$$

在原有 L_I 的基础上，虚拟阻抗可等效为 1 个 R_I 与之并联的形式，改进虚拟阻抗如图 8(b)所示，将二倍频谐波分量去除后，通过调节 R_I 和 L_I，改变虚拟阻抗，实现对高倍频偶次谐波分量的抑制，进而得到 $u_{zj,h}$。将上述的 2 个环流抑制量相加即可得到实际环流抑制量 u_{zj}，在修正桥臂电压参考值后，得到电流内环输出电压 u_{ej}。上桥臂与下桥臂电压可表示为

$$\begin{cases} u_{pj}=\dfrac{1}{2}U_{dc}-u_{ej}-u_{zj} \\ u_{nj}=\dfrac{1}{2}U_{dc}+u_{ej}-u_{zj} \end{cases} \tag{12}$$



(a) 虚拟阻抗等效电路　　(b) 改进虚拟阻抗

图 8　虚拟阻抗控制框图

Fig. 8 Control block diagram of virtual impedance

加入虚拟阻抗的 QPR 控制器的抑制策略如图 9 所示。

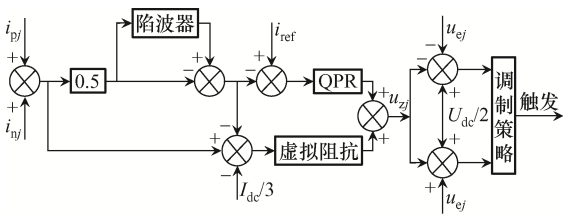


图 9　加入虚拟阻抗的 QPR 控制器抑制策略框图

Fig. 9 Block diagram of suppression strategy for QPR controller with virtual impedance

3 仿真分析

3.1 环流抑制仿真分析

为验证加入虚拟阻抗的 QPR 环流抑制方法的有效性，在 MATLAB 2019b 软件版本 Simulink 中搭建三相 21 电平的 MMC-HVDC 系统进行仿真验证，具体参数见表 1。

表 1 MMC 系统仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters of MMC system

参数	数值
直流侧母线电压 U_{dc}/V	1 200
桥臂子模块数量 n	20
子模块电容 C/mF	2.2
桥臂电感 L_m/mH	8
桥臂内阻 R_m/Ω	0.08
交流侧等效电感 L_s/mH	10
交流侧等效电阻 R_s/Ω	0.08

在仿真中，MMC 系统调制方式为最近电平逼近调制 NLM(nearest level modulation)策略。图 10 为 MMC 未加入环流抑制的环流波形，波形上、下严重波动，上、下峰值相差 60 A 以上；图 11 为 MMC 加入 QPR 控制的环流波形，幅值上、下波动范围减小为 8 A，环流抑制范围变小；图 12 为 MMC 加入虚拟阻抗的 QPR 控制的环流波形，相较于图 11，幅值上、下波动范围减小为 5 A，环流抑制范围变得更小。

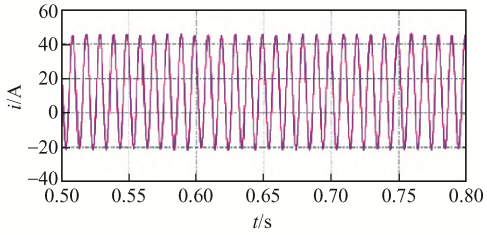


图 10 未加入环流抑制的环流波形

Fig. 10 Waveform of circulating current without circulating current suppression

图 13 为 MMC 未加入环流抑制的桥臂电流波形，可见，桥臂电流发生严重畸变，上、下峰值差达 124 A；图 14 为 MMC 加入 QPR 控制的桥臂电流波形，桥臂电流畸变量变小，抑制了环流的二倍频分量；图 15 为 MMC 加入虚拟阻抗的 QPR 控制的桥臂电流波形，桥臂电流畸变量变小，抑制了二倍频分量和高倍频分量。

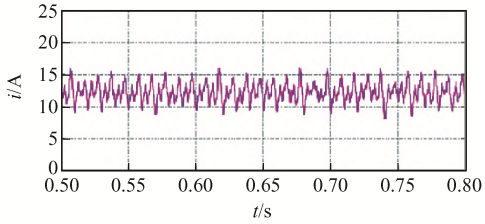


图 11 加入 QPR 控制的环流波形

Fig. 11 Waveform of circulating current controlled by QPR

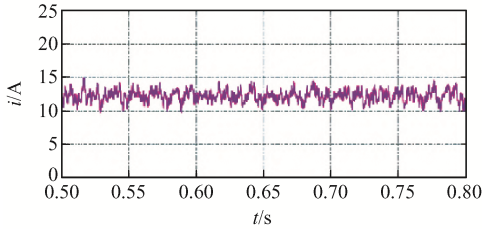


图 12 加入虚拟阻抗的 QPR 控制的环流波形

Fig. 12 Waveform of circulating current controlled by QPR with virtual impedance

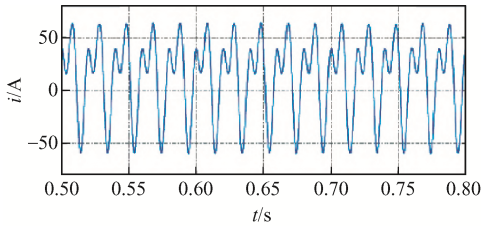


图 13 未加入环流抑制的桥臂电流波形

Fig. 13 Waveform of bridge arm current without circulating current suppression

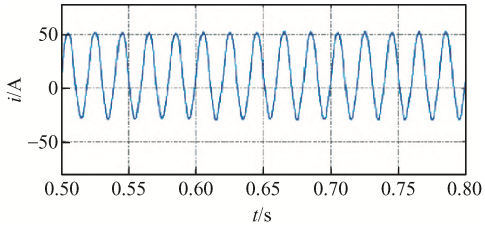


图 14 加入 QPR 的桥臂电流波形

Fig. 14 Waveform of bridge arm current controlled by QPR

为进行更直观的对比，图 16 为 MMC 加入 QPR 控制的桥臂电流的快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)分析，其总谐波畸变率 THD(total

harmonic distortion)为 4.82%；图 17 为 MMC 加入虚拟阻抗的 QPR 控制的桥臂电流 FFT 分析，其 THD 为 2.37%。可见，本文提出的抑制策略对桥臂电流的改善效果更好，波形更趋近于正弦波。

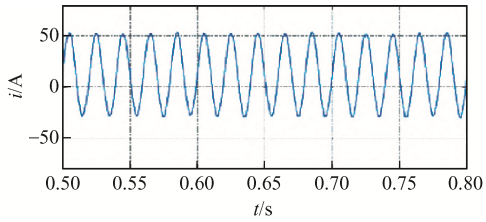


图 15　加入虚拟阻抗的 QPR 桥臂电流波形

Fig. 15 Waveform of bridge arm current controlled by QPR with virtual impedance

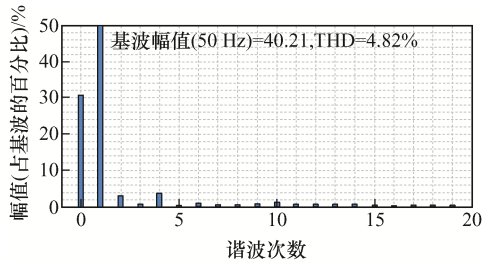


图 16　加入 QPR 控制的桥臂电流 FFT 分析

Fig. 16 FFT analysis of bridge arm current controlled by QPR

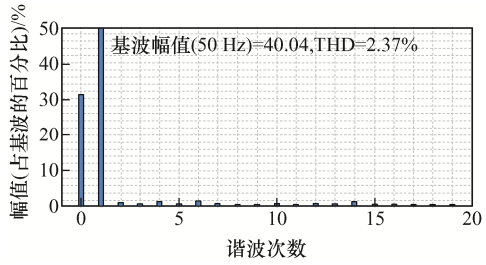


图 17　加入虚拟阻抗的 QPR 控制的桥臂电流 FFT 分析

Fig. 17 FFT analysis of bridge arm current controlled by QPR with virtual impedance

3.2 HVDC 仿真分析

为验证加入虚拟阻抗的 QPR 控制的环流抑制方法在三相 MMC-HVDC 系统中的控制性能，在 MATLAB 2019b 软件版本 Simulink 中搭建三相 21 电平的 MMC-HVDC 系统进行仿真验证。仿真系统参数仍见表 1。

图 18(a)、(b)分别为 QPR 控制方法得到的 MMC1、MMC2 交流侧电流仿真波形，电流畸变率为 1.25%；图 19(a)、(b)分别为加入虚拟阻抗的 QPR 控制方法得到的 MMC1、MMC2 交流侧电流仿真波形，电流畸变率为 0.79%。可见，加入虚拟阻抗的 QPR 控制策略具有较优的电流控制效果。

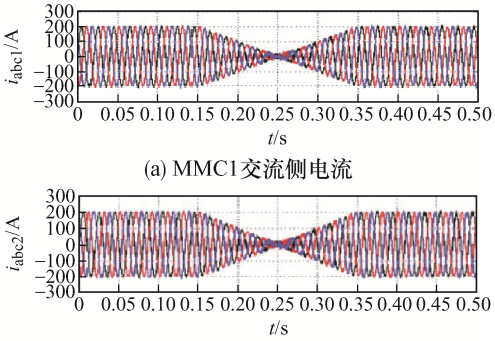


图 18　QPR 控制下的交流侧电流波形

Fig. 18 Waveforms of AC-side current under QPR control

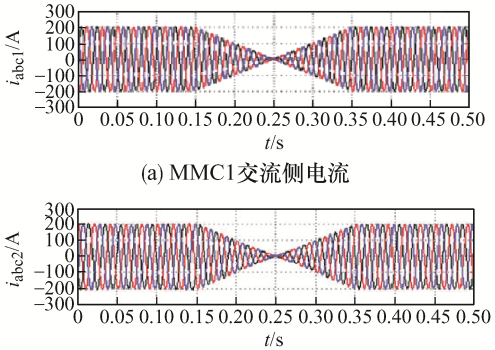


图 19　加入虚拟阻抗的 QPR 控制下的交流侧电流波形

Fig. 19 Waveforms of AC-side current under QPR control with virtual impedance

4　结语

本文提出一种 MMC-HVDC 环流抑制方法，设计适用于 MMC-HVDC 系统的有功/无功控制策略，同时针对 MMC 的二倍频分量和高倍频环流问题，设计加入虚拟阻抗的 QPR 控制环流抑制策略，实现了对环流的有效抑制，减少了 MMC 的运行损失，提高了运行效率。此外，本文通过 MMC-HVDC 系统仿真模型进行环流抑制仿真，结果表明，与传统的 QPR 控制策略相比，加入虚拟阻抗的 QPR 控制

策略具有更优的电流控制效果。

参考文献：

[1] 江友华, 陈芳, 赵乐, 等. 不平衡电网电压条件下 MMC 控制策略综述[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 74-87.
Jiang Youhua, Chen Fang, Zhao Le, et al. Review of control strategies for modular multilevel converter under unbalanced grid voltage [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 74-87. (in Chinese)

[2] 李志勇, 吕堂锋, 曹原, 等. 准 Z 源 MMC 储能系统与退役电池接入优化控制[J]. 电源技术, 2025, 49(6): 1286-1295.
Li Zhiyong, Lü Tangfeng, Cao Yuan, et al. Access optimazation control of quasi-Z source MMC energy storage system and retired battery [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(6): 1286-1295. (in Chinese)

[3] Wang Zhen, Peng Li. Grouping capacitor voltage estimation and fault diagnosis with capacitance self-updating in modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1532-1543.

[4] 潘尧, 孙孝峰, 蔡瑶, 等. 一种拓展模块化多电平变换器的光伏系统稳定运行范围的谐波补偿调制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1132-1146.
Pan Yao, Sun Xiaofeng, Cai Yao, et al. A harmonic compensation modulation strategy for extending steady operation range of modular multilevel converter-based photovoltaic system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1132-1146. (in Chinese)

[5] 李慧, 张鹏, 刘思嘉. MMC 环流抑制策略的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 30-38.
Li Hui, Zhang Peng, Liu Sijia. Transient analysis of MMC circulating current suppression strategy [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 30-38. (in Chinese)

[6] Duan Pan, Fu Zhengzheng, Yang Ming, et al. An adaptive-impedance fault current limiter for accelerating fault current suppression in MMC-HVDC systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(12): 2319-2330.

[7] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547-552.
Tu Qingrui, Xu Zheng, Zheng Xiang, et al. Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 547-552. (in Chinese)

[8] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下模块化多电平换流器的直流环流均衡策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 541-553.
Pan Zixun, Yang Xiaofeng, Zhao Rui, et al. DC circulating current balancing control of modular multilevel converter under unbalanced power grid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 541-553. (in Chinese)

[9] 景旭川, 曹以龙, 江友华. PR+虚拟阻抗复合控制的 MMC 环流抑制策略[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(3): 221-225.
Jing Xuchuan, Cao Yilong, Jiang Youhua. Circulation suppression strategy of MMC based on PR+Virtual impedance compound control [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(3): 221-225. (in Chinese)

[10] 吴嘉琪, 罗念华, 朱劲磊, 等. 用于 VSC-HVDC 系统谐波抑制的 PI 与 VPI 并联控制[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 130-138.
Wu Jiaqi, Luo Nianhua, Zhu Jinlei, et al. PI parallel VPI control for harmonic suppression of VSC-HVDC system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 130-138. (in Chinese)

[11] 张延彬, 杨晓峰, 潘子迅, 等. 模块化多电平换流器改进无差拍电流预测控制[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(6): 43-50.
Zhang Yanbin, Yang Xiaofeng, Pan Zixun, et al. Improved deadbeat current predictive control for modular multilevel converter [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(6): 43-50. (in Chinese)

[12] 柳舟洲, 同向前. 基于准 PR 控制器的 MMC-HVDC 的控制及环流抑制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 70-75.
Liu Zhouzhou, Tong Xiangqian. Strategies of MMC-HVDC control and circulation current suppression based on quasi-PR controller [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(11): 70-75. (in Chinese)

[13] 董一诺, 白志红. 一种应用于 MMC 的具有较高次环流抑制功能的改进载波移相调制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 96-104.
Dong Yinuo, Bai Zhihong. Improved carrier phase-shifted modulation strategy applied to MMC with higher-order circulating current suppression function [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 96-104. (in Chinese)
[14] 李清, 徐彦, 彭光强, 等. 基于虚拟阻抗的 MMC 降损策略研究[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 152-160.
Li Qing, Xu Yan, Peng Guangqiang, et al. Research on loss reduction strategy for MMC based on virtual impedance [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 152-160. (in Chinese)



王君瑞

作者简介：

王君瑞(1978—　)，女，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源发电技术，微网控制及电机控制技术。E-mail：jr09110111@163.com。

豆帅(1999—　)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：新能源与电力电子技术。E-mail：d476305310@163.com。

王铭(1999—　)，女，硕士研究生。研究方向：新能源监测。E-mail：wm134853@163.com。

(责任编辑：耿越)

关于公开征集第十一批中国电源学会团体标准项目提案的通知

根据《国家标准化发展纲要》等文件要求，依照《中国电源学会团体标准管理办法》，现开展第十一批立项团体标准项目征集工作。现将有关事宜通知如下。

一、基本概况

学会自 2016 年启动标准建设工作以来，已累计发布团体标准 114 项，内容覆盖电源及相关行业主要技术领域，目前已有多项团体标准成功升级转化为国家标准、行业标准与地方标准，有效填补了现有国家标准化体系的相关领域空白，为电源行业技术迭代与产业规范化发展提供了坚实支撑。

二、申报要求

提案应以电源领域发展迫切需要或参与国内外市场竞争亟需的技术、产品标准为方向，兼顾前瞻性和实用性，提倡与相关领域国际标准接轨，避免与现行国家标准、行业标准及地方标准重复。优先选择市场化程度高、技术创新活跃、标准需求较多的领域，优先制定市场急需而又空白的标准，积极推进先进企业标准上升为团体标准，鼓励将科研成果、工程实践融入标准文本。

……

三、申报流程和时间

提案发起单位可点击以下链接进入中国电源学会团体标准申报系统(http://www.cpss.org.cn/Logins/GroupStandard)，以学会个人会员或团体会员账号登录，选择左侧菜单“团体标准项目”→“我要提案”选项，在 2026 年 11 月 20 日前按要求完成提案信息填写。

四、联系方式

中国电源学会团体标准工作办公室

联系人：谢小东　陈帆

联系电话：022-27793740　87574851

邮箱：standard@cpss.org.cn