

## 新能源

## 考虑延时补偿的配电网柔直网侧谐波电流抑制策略

朱海勇<sup>1</sup>, 吴小丹<sup>1</sup>, 董云龙<sup>1</sup>, 吴永华<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 裘鹏<sup>2</sup>, 戚宣威<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

**摘要:** 在配电网系统中普遍存在非线性负载引起的谐波电流污染现象, 通过适当控制策略的优化, 基于 MMC-MVDC(模块化多电平换流器中压直流)的配电网柔性直流输电系统可以实现网侧谐波电流的有效抑制。在柔直内环 PI 控制器的基础上, 基于比例谐振控制器实现谐波电流的无静差跟踪, 提出一种配电网柔直网侧电流闭环控制策略, 无需谐波分离算法, 采用基波和谐波电流独立、控制链路延时补偿的双序闭环控制结构, 可同时实现多端系统互联、潮流优化以及谐波治理功能。利用 MATLAB 分析了功率控制环和谐波抑制环幅频特性, 证明该控制策略具有良好的稳定性。方案应用到三端配电网柔直系统, RTDS 试验结果验证了控制策略的正确性和有效性。

**关键词:** MMC-MVDC; 谐波抑制; 谐振控制器; 延时补偿

文章编号: 1007-1881(2021)11-0078-07

DOI: 10.19585/j.zjdl.202111012

中图分类号: TM721.1

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Harmonic Current Suppression Strategy of MMC-MVDC Considering Delay Compensation

ZHU Haiyong<sup>1</sup>, WU Xiaodan<sup>1</sup>, DONG Yunlong<sup>1</sup>, WU Yonghua<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, QIU Peng<sup>2</sup>, QI Xuanwei<sup>2</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Harmonic current pollutions caused by nonlinear loads is a universal phenomenon in distribution systems. The medium voltage direct current distribution system based on a modular multilevel converter (MMC-MVDC) can effectively suppress the harmonic current on the network side by optimizing the appropriate control strategy. In this paper, based on the traditional inner loop PI controller, the harmonic current tracking without static difference is realized based on the proportional resonance controller, and a network-side current closed-loop control strategy of the MMC-MVDC distribution system is proposed, which dispenses with harmonic separation algorithm and employs a dual closed-loop control structure with independent fundamental and harmonic current and the control link delay compensated. It can realize multi-terminal system interconnection, power flow optimization and harmonic control at the same time. Based on MATLAB, the amplitude-frequency characteristics of the power control loop and harmonic suppression loop are analyzed, and the excellent stability of the system is verified. The scheme is applied to the three-terminal MMC-MVDC distribution system, and the RTDS test results verify the correctness and effectiveness of the control strategy.

**Keywords:** MMC-MVDC; harmonic suppression; resonance controller; time delay compensation

## 0 引言

基于 MMC-MVDC(模块化多电平换流器中压

直流)的配电网系统以其灵活可控、不依赖交流电网、可隔离交流故障、易于分布式能源并网等特性, 可实现配电网、多元能源及负荷的电能互联, 具备能量多向柔性控制、均衡负荷和连续负荷转供, 提升供电质量及可靠性的能力<sup>[1-4]</sup>。

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(2021ZK07)

随着 MMC-MVDC 的广泛应用,其应用场景也多种多样。非线性负载产生的谐波电流污染是电网主要电能质量问题之一,对电网安全运行产生严重危害并降低电能使用效率。MMC-MVDC 本质上是电压源型换流器,其经典的 PI(比例-积分)控制器在基于旋转坐标变换的矢量控制方案中可实现直流量的无静差调节,实现有功功率、无功功率、直流电压以及交流电压控制。然而非线性负载产生的谐波电流频率范围较宽,PI 控制器高频增益较低,不能满足控制要求。PR(比例-谐振控制器)在谐振点处有无穷大增益,能无静差地跟踪谐波电流,是谐波治理的良好选择。当前,网侧谐波电流抑制方法主要集中在有源电力滤波器领域,文献[5]提出了一种基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法,文献[6]提出一种基于基波和谐波电流独立的双闭环控制结构的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法。然而,MMC-MVDC 领域关于网侧谐波电流抑制文献较少。文献[7]探讨了直流配电网中直流侧电能质量问题,文献[8]对柔性直流配电网交流侧不对称故障进行研究,文献[9]提出了基于谐振补偿的 MMC 网侧低次谐波抑制方法。由于控制链路延时是造成柔性直流系统接入交流电网后引发高频震荡的重要原因<sup>[10-13]</sup>,因此,在考虑延时补偿条件下,研究 MMC-MVDC 谐波电流抑制策略具有重要意义和工程应用价值。

本文以 MMC-MVDC 为研究对象,以谐波抑制和功率控制为研究目标,分析了基于控制链路延时补偿的 PR 控制器的网侧电流闭环谐波抑制的原理。基于 MATLAB 分析了功率控制环和谐波抑制环幅频特性,并与传统 PR 控制器的谐波抑制稳定性进行对比。最后将该方案应用到三端柔直配电网系统,通过 RTDS 仿真试验,验证了所提控制策略的正确性和有效性。

## 1 MMC-MVDC 系统结构和控制策略

三端柔直配电网系统结构如图 1 所示。三端交流系统通过三端背靠背柔直连接,实现交流系统合环。

以端口 1 为例,分析网侧电流闭环控制方法。图 2 为柔直系统端口 1 接入交流电网的等效电路图。

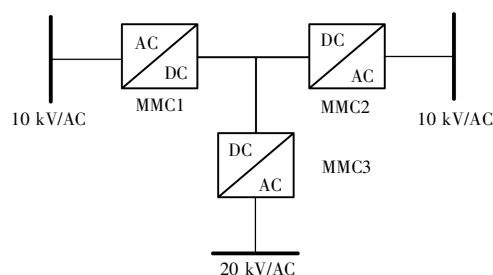


图 1 三端 MMC-MVDC 系统结构

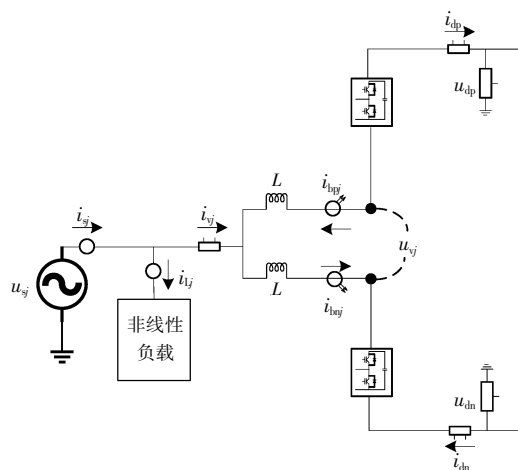


图 2 柔直系统端口 1 等效电路

图 2 中  $u_{sj}(j=a, b, c)$  为交流系统的网侧三相电压,  $u_{vj}$  为阀侧三相电压,  $i_{sj}$  为网侧三相电流,  $i_{vj}$  为阀侧三相电流,  $i_{lj}$  为网侧非线性负载三相电流,  $i_{bj}$ 、 $i_{bj}$  分别为上下桥臂的桥臂电流,  $u_{dp}$ 、 $u_{dn}$  分别为正负极直流电压,  $i_{dp}$ 、 $i_{dn}$  分别为正负极直流电流, 箭头方向表明各个电流的正方向,  $L$  为桥臂电感。

### 1.1 柔直系统功率控制系统结构

首先分析柔直系统数学模型。按照图 2 所示参考方向,忽略回路电阻,建立柔直与交流系统平衡运行方式下的网侧电压、阀侧电流、阀侧电压表达式,如下所示:

$$\begin{cases} L_{\text{eq}} \frac{di_{va}(t)}{dt} = u_{sa}(t) - u_{va}(t) \\ L_{\text{eq}} \frac{di_{vb}(t)}{dt} = u_{sb}(t) - u_{vb}(t) \\ L_{\text{eq}} \frac{di_{vc}(t)}{dt} = u_{sc}(t) - u_{vc}(t) \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $L_{\text{eq}} = \frac{L}{2}$ , 为等效电抗。

对式(1)进行  $dq$  坐标变换, 从而得到  $dq$  坐标系下的电压、电流表达式:

$$\begin{cases} L_{\text{eq}} \frac{di_{vd}}{dt} = u_{sd} + \omega L_{\text{eq}} i_{vq} - u_{vd} \\ L_{\text{eq}} \frac{di_{vq}}{dt} = u_{sq} - \omega L_{\text{eq}} i_{vd} - u_{vq} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $i_{vd}$ ,  $i_{vq}$  为阀侧电流的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  为网侧电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{vd}$ ,  $u_{vq}$  为阀侧电压的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\omega$  为角频率。

根据公式(2), 可以得到 MMC 的电流控制框图如图 3 所示。

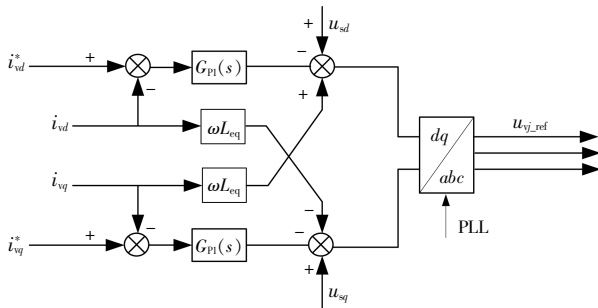


图 3 柔直系统电流控制框图

图中  $i_{vd}^*$ ,  $i_{vq}^*$  分别为阀侧电流的  $d$ 、 $q$  轴分量指令值,  $u_{vj\_ref}$  为阀侧电压指令值, PLL 为  $u_{sa}$  的相角,  $G_{PI}(s)$  为 PI 控制器的传递函数。外环功率控制器的作用是计算内环控制器的电流参考值, 根据所控制目标的不同, 外环控制可以实现定直流电压控制、定有功功率控制、定频率控制、定无功功率控制和定交流电压控制等。外环控制器多采用 PI 控制器<sup>[41]</sup>, 该部分本文不再赘述。

## 1.2 网侧谐波电流抑制系统结构

图 2 中非线性负载将在网侧电流中引入谐波成分, 对电能质量产生危害。MMC-MVDC 本质上是电压源型换流器, 其经典的 PI 控制算法可在  $dq$  坐标系中完成直流侧电压稳定和直流量指令跟随, 实现有功功率、无功功率、直流电压以及交流电压控制。然而非线性负载产生的谐波电流频率范围较宽, 以 5 次、7 次、11 次居多, 传统 PI 控制器高频增益较低, 不能满足控制要求。PR 在谐振点处有无穷大增益, 能无静差跟踪谐波电流, 是谐波治理的良好选择。使用 PR 控制器做谐波控制时, 在  $\alpha\beta$  静止坐标系中, 无需锁相环节并且无需对正负序谐波进行分离控制, 可由一

个谐振控制器同时控制正负序谐波。

由此基于网侧谐波电流检测的闭环 PR 控制框图如图 4 所示。在柔直系统电流内环叠加谐波抑制环节, 以负载谐波电流为指令值, 经过 PR 控制器, 对 5 次、7 次、11 次谐波无静差跟踪, 由阀侧电流  $i_{vj}$  补偿谐波电流, 最终实现网侧电流的谐波治理。图中  $i_{1\alpha}^*$ ,  $i_{1\beta}^*$  分别为网侧非线性负载电流  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量指令值, 简称谐波电流  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量指令值,  $i_{v\alpha}$ ,  $i_{v\beta}$  为阀侧电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量,  $G_H(s)$  为谐波抑制 PR 控制器的传递函数。

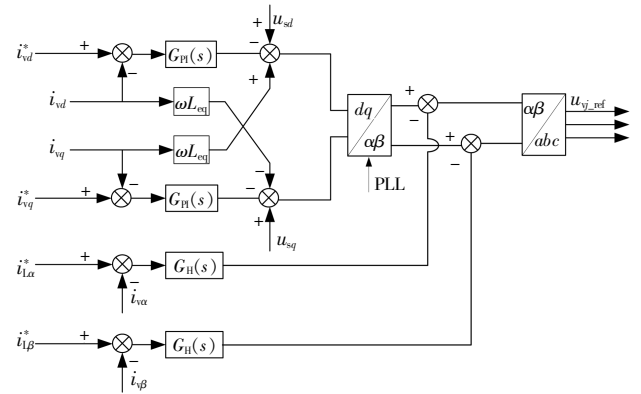


图 4 含网侧谐波电流抑制的电流控制框图

将图 4 转化成图 5 MMC-MVDC 网侧电流闭环控制策略。图中  $i_{1\alpha\beta}^*$  为  $s$  域下谐波电流  $\alpha\beta$  坐标系下的指令值,  $i_{v\_dq}^*$  为  $s$  域下阀侧电流  $dq$  坐标系下的指令值,  $u_s$  为  $s$  域下网侧电压,  $i_{v\_abc}$  为  $s$  域下阀侧 abc 三相电流,  $G_{PI}(s)$  为柔直系统功率控制环节 PI 控制器的传递函数,  $G_{MMC}(s)$  为被控对象的传递函数,  $G_H(s)$  为谐波抑制 PR 控制器的传递函数,  $G_d(s)$  为控制系统延时传递函数,  $K_{PWM}$  为换流器输出增益, 本文取  $K_{PWM} \approx 1$ 。

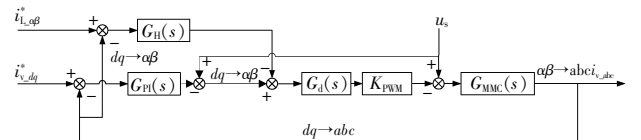


图 5 MMC-MVDC 网侧电流闭环控制策略

## 2 电流环控制器设计

### 2.1 具备延时补偿的 PR 控制器原理

MMC-MVDC 的受控对象可视为典型的阻感性负载, 其在  $\alpha\beta$  静止坐标系下的传递函数可表

示为<sup>[15]</sup>:

$$G_{MMC}(s) = \frac{1}{L_{eq}s + R} \quad (3)$$

式中:  $L_{eq}$  和  $R$  分别为 MMC-MVDC 连接电抗器的电感和等效电阻<sup>[16-17]</sup>。

在  $dq$  旋转坐标系中, 正序及负序电流控制均可利用 PI 控制器实现对电流的无静差控制, PI 控制器由下式给出:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

式中:  $K_p$  为比例系数,  $K_i$  为积分系数。在同步旋转坐标系( $dq$ )和静止坐标系( $\alpha\beta$ )中, 通过卷积变换可以实现旋转坐标系下的 PI 控制器向静止坐标系下的 PR 控制器的转换:

$$G_{\alpha\beta}(s) = K_p + \frac{K_i}{s + j\omega_1} + \frac{K_i}{s - j\omega_1} = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (5)$$

PR 控制器传递函数  $G_{PR}(s)$  为:

$$G_{PR}(s) = 2K_{pr} + \frac{2K_{ir}s}{s^2 + \omega_1^2} \quad (6)$$

式中:  $K_{pr}$  和  $K_{ir}$  为 PR 控制器的比例系数和谐振系数;  $\omega_1$  为基波角频率。

由于 MMC-MVDC 控制链路延时在高频段将给谐波控制带来显著的影响。为了降低系统延时在高频段带来的相位偏移影响, 谐波抑制采用带延时补偿的 PR 控制器<sup>[18]</sup>, 因此式(5)需修改为:

$$G_{\alpha\beta}(s) = K_p + e^{\omega_n T_d} \frac{K_i}{s + j\omega_1} + e^{\omega_n T_d} \frac{K_i}{s - j\omega_1} \\ = K_p + K_i \frac{2s \cos(\omega_n T_d) - 2\omega_n \sin(\omega_n T_d)}{s^2 + \omega_1^2} \quad (7)$$

工程应用中, 为了获得被控制谐波频率处较大的控制效果, 可以将完全谐振控制改为准谐振控制, 对于多次谐波抑制, 将 PR 控制器并联成组<sup>[18]</sup>, 得到的谐波抑制控制器传递函数  $G_H(s)$  为:

$$G_H(s) = \sum_{n=5,7,11} \frac{K_H 2\omega_d [s \cos(\omega_n T_d) - \omega_n \sin(\omega_n T_d)]}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (8)$$

式中:  $K_H$  为  $n$  次谐波 PR 控制器的谐振系数;  $\omega_n$  为  $n$  次谐波角频率;  $\omega_c$  为用于设计谐振控制器带宽, 一般取  $0.01\omega_n$ ;  $T_d$  为控制链路延时时间。

图 5 中的延时传递函数  $G_d(s)$ , 可采用二阶派德等效近似表示为<sup>[17]</sup>:

$$G_d(s) = e^{-sT_d} \approx \frac{1 - T_d s / 2 + (T_d s)^2 / 12}{1 + T_d s / 2 - (T_d s)^2 / 12} \quad (9)$$

式中:  $T_d = 1.5T$ ,  $T$  为控制系统采样周期。

## 2.2 稳定性分析

$dq$  坐标系中的 PI 控制器等效为  $\alpha\beta$  坐标系中的 PR 控制器后, 图 5 中坐标变化得到简化, 可全部统一至  $\alpha\beta$  坐标系中, 如图 6 所示。图中  $i_{v,\alpha\beta}^*$  为  $s$  域下阀侧电流  $\alpha\beta$  坐标系下的指令值;  $i_{v,\alpha\beta}$  为  $s$  域下  $\alpha\beta$  坐标系的阀侧电流。

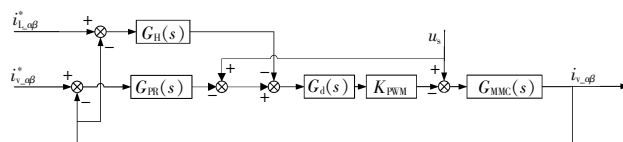


图 6  $\alpha\beta$  坐标系中 MMC-MVDC 闭环谐振控制策略

根据叠加原理, 图 6 可分为以有功无功功率电流指令为输入的功率控制环和以负载电流变化为输入的谐波控制环如图 7 所示。

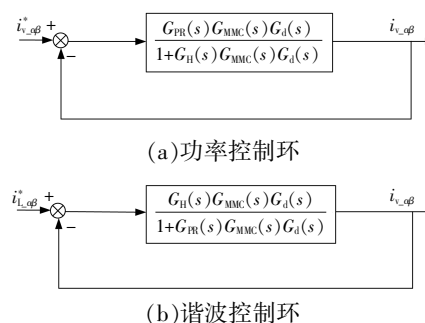


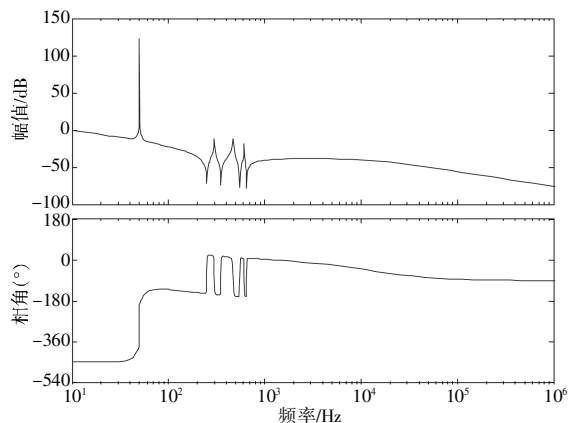
图 7 简化后的电流闭环谐振控制策略

其中, 功率控制环和谐波控制环的开环传递函数分别为  $G_{H1}(s)$ ,  $G_{H2}(s)$ :

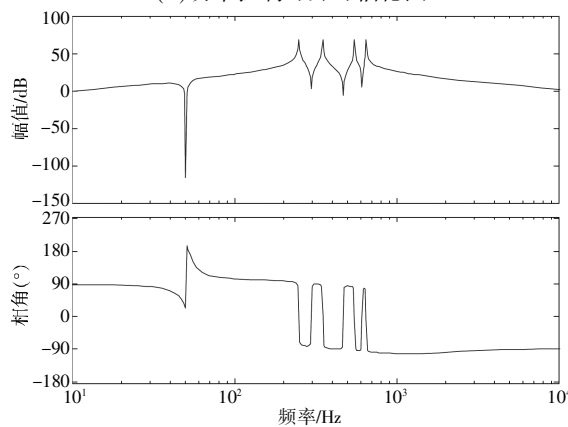
$$\begin{cases} G_{H1}(s) = \frac{G_{PR}(s)G_{MMC}(s)G_d(s)}{1 + G_{PR}(s)G_{MMC}(s)G_d(s)} \\ G_{H2}(s) = \frac{G_{PI}(s)G_{MMC}(s)G_d(s)}{1 + G_{PI}(s)G_{MMC}(s)G_d(s)} \end{cases} \quad (10)$$

采用 MATLAB 绘制  $G_{H1}(s)$ ,  $G_{H2}(s)$  的伯德图。功率控制环开环传递函数  $G_{H1}(s)$  的伯德图如图 8(a)所示。幅频曲线中, 基波频率处的增益很大, 有利于减小功率控制稳态误差, 在谐波频率处增益很小, 对谐波抑制作用十分有限; 相频曲线中, 相位裕度大于  $45^\circ$ , 满足稳定性要求。

谐波控制环开环传递函数  $G_{H2}(s)$  的伯德图如图 8(b)所示。幅频曲线中, 基波频率处的增益很小, 避免了谐波控制环对基波的影响, 在各谐波频率处增益很大, 有利于减小谐波控制稳态误差;



(a) 功率控制环开环伯德图



(b) 谐波控制环开环伯德图

图8 功率控制环和谐波控制环的开环伯德图

相频曲线中, 相位裕度大于  $90^\circ$ , 满足稳定性要求<sup>[19]</sup>。

### 2.3 传统 PR 控制器的谐波控制环稳定性分析

为了与传统方法进行对比, 谐波抑制控制器传递函数  $G_h(s)$  可采用式(6)传统 PR 控制器进行并联成组, 得到谐波抑制控制器传递函数  $G_h(s)$ :

$$G_h(s) = \sum_{n=5,7,11} \frac{2K_{pr}s^2 + 2K_{ir}s + 2K_{pr}\omega_n^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_n^2} \quad (11)$$

将式(11)代入到式(10)谐波控制环的开环传递函数  $G_{h2}(s)$  中, 得到基于传统 PR 控制器的谐波控制环的开环传递函数  $G_{h2}(s)$ , 采用 MATLAB 绘制  $G_{h2}(s)$  的伯德图, 如图 9 所示。

相频曲线中, 由于控制链路延时和被控对象(阻感性负载)自身的相位滞后, 增大  $K_{pr}$ ,  $K_{ir}$  很容易使得相频曲线在高频段最先穿  $-180^\circ$  线, 使得系统不稳定。而采用控制链路延时补偿的 PR 控制器图 8 所示, 谐波控制环高频段相频曲线依旧满足稳定性要求。

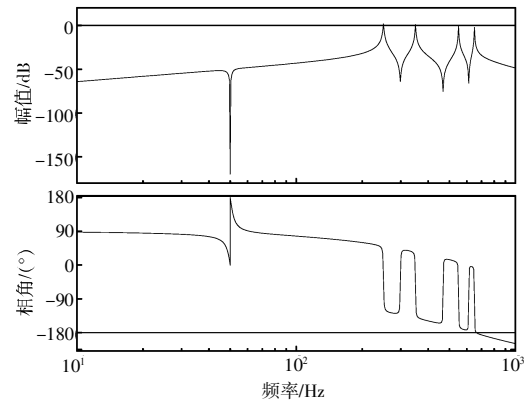


图9 传统 PR 控制器的谐波控制环开环伯德图

## 3 试验验证

为了验证所提网侧电流控制方法的正确性, 在 RTDS 动模实验平台搭建了如图 1 所示的三端 MMC-MVDC 配电网仿真平台。三端 MMC-MVDC 配电网 RTDS 仿真平台是一种半实物的架构, RTDS 仿真系统通过对模型的运算来实现一次系统的功能, 其与工程实际使用的控制保护设备的连接如图 10 所示<sup>[20-21]</sup>。

实验使用的三端 MMC-MVDC 柔直工程, 相关控制参数如表 1 所示。

表1 三端 MMC-MVDC 试验参数

参数	站 1、站 2	站 3
额定容量/MVA	10	10
交流电压等级/kV	10	20
直流电压等级/kV	20	20
桥臂电感/mH	17	17
比例系数 $K_{pr}/\Omega$	4	100
谐振系数 $K_{ir}/(\Omega \cdot s^{-1})$	10	10
比例系数 $K_r/\Omega$	5	5
谐振系数 $K_i/(\Omega \cdot s^{-1})$	333.3	333.3
采样周期 $T/s$	$10^{-4}$	$10^{-4}$

试验中, 在站 1 进行网侧电流谐波抑制试验。站 1 工作于 PQ 控制模式, 有功功率指令值为 2 MW, 无功功率指令值为 0 Mvar, 非线性负载设置为谐波注入形式, 5 次、7 次、11 次谐波电流均为 12 A。

MMC-MVDC 运行过程中, 有功功率、无功功率控制是基础功能, 谐波抑制功能可根据需要投退, 本试验验证谐波抑制策略投入后, 网侧谐

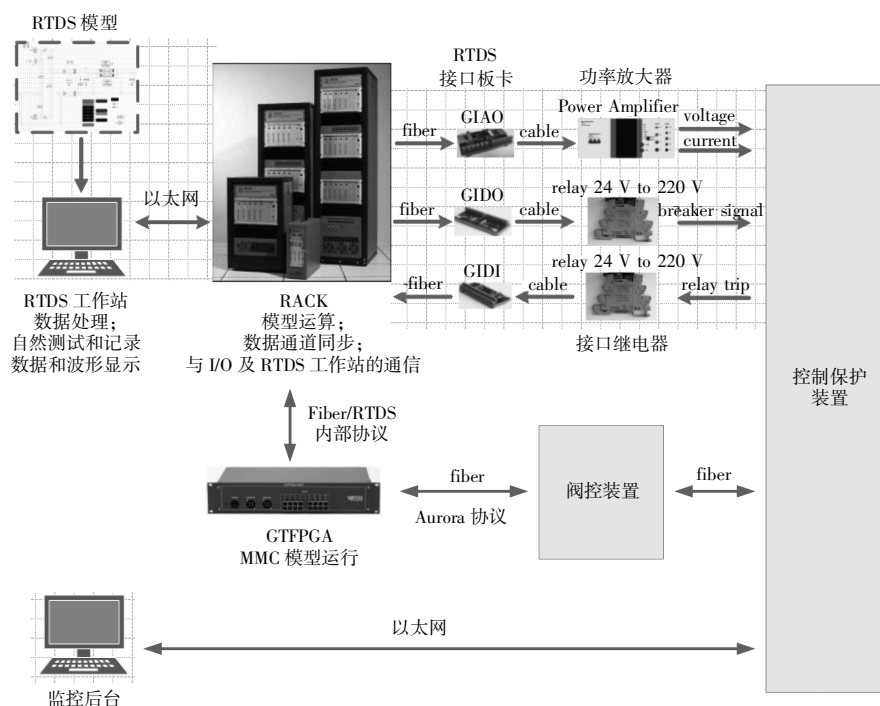
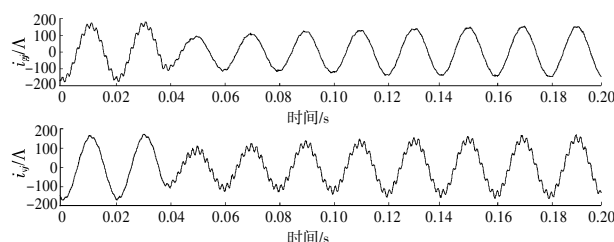


图10 三端 MMC-MVDC RTDS 试验平台整体架构

波电流的治理效果。

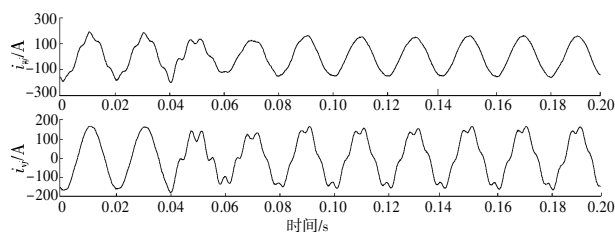
### 3.1 单次谐波抑制试验

非线性负载分别注入5次、7次、11次谐波电流，0.04 s时分别投入5次、7次、11次谐波抑制功能，5次、7次、11次单次谐波抑制结果如图11(a)、(b)、(c)所示，谐波抑制功能投入后，换流器电流  $i_v$  补偿谐波电流， $i_v$  中谐波电流明显增加，约一个基波周期内，网侧电流  $i_g$  中的谐波被有效抑制。

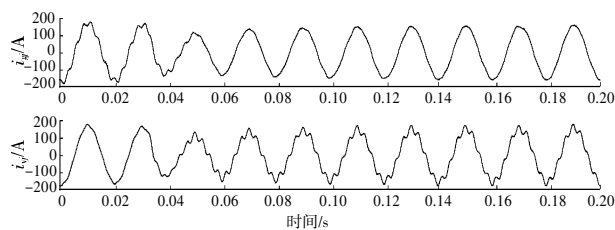


(c)网侧11次谐波电流治理过程

图11 单次谐波电流抑制试验



(a)网侧5次谐波电流治理过程



(b)网侧7次谐波电流治理过程

### 3.2 多次谐波同时抑制试验

非线性负载同时注入5次、7次、11次谐波电流，0.04 s时同时投入5次、7次、11次谐波抑制功能，5次、7次、11次谐波同时抑制结果如图12(a)所示，谐波抑制功能投入后，换流器补偿电流中谐波电流明显增加，约在一个基波周期内，网侧电流中的谐波被有效抑制。

谐波抑制的数据统计如图12(b)、表2所示，20次谐波范围内无其他次谐波放大，5次、7次、11次谐波抑制比均超过83%，THD下降超过84%。

## 4 结论

为实现配电网柔直功率控制兼谐波抑制功能，满足对非线性负荷应用场景的电能质量治理

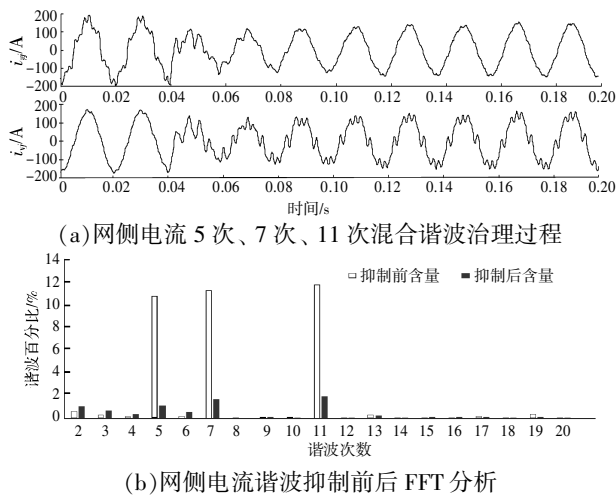


图12 多次谐波电流同时抑制试验

表2 谐波抑制数据统计

	补偿前/%	补偿后/%	抑制比/%
5次	11.08	1.149	89.62
7次	11.55	1.715	85.15
11次	12.07	1.963	83.73
THD	20.08	3.21	84.01

需求,本文提出了基于谐振控制器的网侧谐波电流抑制策略,并补偿控制链路延时,提升系统在高频段的稳定性。通过MATLAB分析了功率控制环和谐波抑制环幅频特性,并与传统谐振控制器稳定性对比,验证了本文所提的控制策略的优越性。最后进行RTDS单次和多次谐波抑制试验,试验结果表明,本文提出的控制策略对5次、7次、11次谐波有良好的治理能力。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 江道灼,郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
- [3] 赵成勇,宋冰倩,许建中.柔性直流电网故障电流主动控制典型方案综述[J].电力系统自动化,2020,44(5):3-13.
- [4] 付强,杜文娟,王海风.基于虚拟阻尼指标的柔性直流电网小信号稳定性分析[J].电力系统自动化,2020,44(11):111-120.
- [5] 易皓,卓放,翟灏.基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究[J].电工技术学报,2015,30(7):72-79.
- [6] 王坚锋,胥芳,潘国兵,等.一种新型有源滤波器网侧电流闭环控制方法[J].电力电子技术,2020,54(5):43-46.
- [7] 韩民晓,谢文强,王超.直流配电网中电能质量问题初探[J].中国标准化,2019(5):125-131.
- [8] 杨峰.柔性直流配电网不平衡控制研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [9] 樊道庆,郭贤朝,刘静佳.模块化多电平的谐波补偿控制策略[J].自动化与仪表,2018,33(2):73-76.
- [10] 郭贤珊,刘泽洪,李云丰,等.柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(1):19-29.
- [11] 李岩,邹常跃,饶宏,等.柔性直流与极端交流系统间的谐波谐振[J].中国电机工程学报,2018,38(增刊1):19-23.
- [12] 郭春义,彭意,徐李清,等.考虑延时影响的 MMC-HVDC 系统高频振荡机理分析[J].电力系统自动化,2020,44(22):119-126.
- [13] 姚广增,彭克,李海荣,等.柔性直流配电网系统高频振荡降阶模型与机理分析[J].电力系统自动化,2020,44(20):29-36.
- [14] 吴桂良.基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [15] 吴小丹,王鹏飞,曹冬明.星形链式 STATCOM 直流侧输入阻抗及交直流功率耦合关系分析[J].电力自动化设备,2021,41(4):70-76.
- [16] 年珩,朱茂玮,徐韵扬,等.基于谐波传递矩阵的 MMC 换流站频率耦合特性建模与分析[J].电力系统自动化,2020,44(6):75-83.
- [17] 年珩,朱茂玮,徐韵扬,等.双闭环定交流电压控制下 MMC 换流站阻抗建模及稳定性分析[J].电力系统自动化,2020,44(4):81-90.
- [18] HARNEFORS L, YEPES A G, VIDAL A, et al. Passivity-based stabilization of resonant current controllers with consideration of time delay[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12):6260-6263.
- [19] FRANKLIN G F, POWELL J D, EMAMI-NAEINI A. 李中华等译.自动控制原理与设计[M].北京:电子工业出版社,2014.
- [20] 董云龙,凌为家,田杰,等.舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J].电力自动化设备,2016,36(7):169-175.
- [21] 高宇膺,杨浩,朱海勇,等.柔性直流配电网的 RTDS 仿真试验研究[J].浙江电力,2021,40(3):1-7.

收稿日期:2021-07-28; 修回日期:2021-08-20

作者简介:朱海勇(1991),男,硕士生,主要研究方向为柔性直流输电系统及应用。

(本文编辑:徐玮韡)