

文章编号:1005-0523(2019)03-0091-08

# 电网电压不平衡下 MMC-HVDC 协调控制策略

肖丹,周鹏辉,宋平岗,杨声弟,谭景辉

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**针对高压直流输电下的电网电压不平衡问题,传统控制策略采用分开抑制负序电流和功率波动,增加了控制的难度,降低了电网稳定性。针对电网电压不平衡问题,文中首先引入功率调节因子,实现电流与功率的协调控制。进一步将比例降阶矢量谐振控制器(PI-ROVRC)作为电流内环控制,比例-积分控制器对电网电流的直流分量实现无静差控制,ROVRC对电网电流中的交流分量进行无差跟踪控制,从而提高MMC交流侧的电流质量。对电网电压不平衡时交流侧的过流问题进一步探讨,采用修正有功功率指令值的方法,将故障时的电流幅值限制在指定范围内,从而提高系统的动态性与可靠性。最后通过PSCAD/EMTDC仿真平台进行仿真验证,结果表明所提控制策略与仿真相符,证明了所提方案可行性和有效性。

**关键词:**模块化多电平换流器(MMC);电网电压不平衡;协调控制;低压限流;比例降阶矢量谐振控制器(PI-ROVRC)

**中图分类号:**TP311

**文献标志码:**A

基于模块化多电平换流器的直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)系统,由于具有有功功率、无功功率的独立控制,无需电网提供无功功率和换相电压,能够实现多落地点受电和多电源供电等优点,而被广泛应用于间歇性新能源并网、孤岛供电、城市配电等领域。相对于传统两端直流输电,其具有更加可靠、灵活、经济等特性<sup>[1-4]</sup>。

电网电压不平衡时,MMC换流器会出现功率波动,电流畸变等问题,电网电压严重不平衡时还会引起MMC换流器出现过电流问题。MMC-HVDC通常采用基于旋转坐标下的双dq-PI控制策略和基于静止坐标下的 $\alpha\beta$ -PR控制策略。使用双dq-PI控制策略时,电压电流正负序分解后分别进行PI控制,锁相环跟踪电网频率的变化,对锁相环的要求高,控制结构复杂。文献[5-9]分别从消除二倍频谐波和相位角的无差跟踪方面对锁相环进行改进,提高了系统的频率自适应性,优化了正负序分离方案。相对于双dq-PI, $\alpha\beta$ -PR无需旋转坐标变换和锁相环,简化了控制结构。但 $\alpha\beta$ -PR对电网频率变化适应性差,对此文献[10-11]提出了在静止坐标系下基于比例降阶谐振调节器的控制策略。但上述策略均是分别以抑制负序电流和以抑制功率波动为目标计算得到电流指令值,进而由电流内环控制器控制电压。两种控制目标分开控制,控制方法灵活性较差。文献[12]通过引入调节系数来合并有功、无功的波动分量,实现有功、无功的协调控制。文献[13]通过分析调节输出电流中的谐波分量来协调控制功率波动和负序电流。但上述控制策略均未考虑电网电压不平衡期间的过流问题对器件所造成的不良影响。

本文提出一种基于比例降阶矢量谐振器(proportional integral plus reduced order vector resonant controller, PI-ROVRC)的MMC-HVDC电流/功率协调控制策略。通过引入功率调节因子实现电流/功率协调控制,针对故障时电网电流存在低次谐波分量的问题,提出比例降阶矢量调节器作为电流内环控制器,减小电流中主要的5次谐波分量。通过功率指令值修正来解决电网电压不平衡时的过流问题。文中所提策略具有以下优点:不需要锁相环;电流和功率协调控制,避免了分开控制,简化了控制结构;综合考虑了电网电压不平衡时的过流问题,设计了低压过流装置,避免了过电流对器件造成损害;模型具有良好的鲁棒性。

收稿日期:2018-11-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51367008)

作者简介:肖丹(1993-),女,硕士研究生,研究方向为电网电压不平衡下换流器的故障穿越。

## 1 MMC 数学模型

图1是三相MMC拓扑图,三相MMC是由三相对称的单相桥臂组成,每相桥臂包含上下对称的2个桥臂,每个桥臂上串联 $N$ 个半桥子模块、1个桥臂电感 $L_r$ 和桥臂等效电阻 $R_r$ 。如图所示: $L_r$ 为桥臂电感, $R_r$ 为桥臂等效损耗电阻; $u_{ij}$ 、 $u_{ij}$ 分别为三相上、下桥臂电压; $U_{dc}$ 为直流侧电压<sup>[14]</sup>。

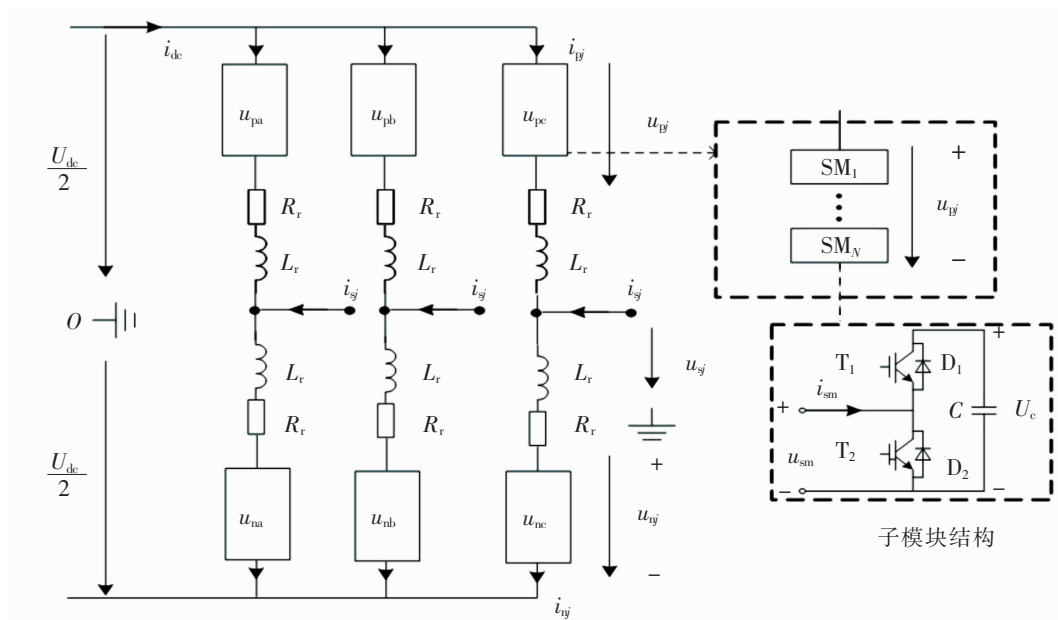


图1 三相 MMC 拓扑图  
Fig.1 Three-phase MMC topology

根据三相 MMC 拓扑图和基尔霍夫定律,可得 MMC 交流侧动态数学方程为

$$u_{sj} = e_j - L_0 \frac{di_{sj}}{dt} - R_0 i_{sj} \quad (1)$$

式中: $e_j = (u_{jn} - u_{jp})/2$ 为 MMC 内部电动势; $u_{sj}$ 、 $i_{sj}$ 分别为三相电网电压和电流; $L_0 = L_r/2$ ,  $R_0 = R_r/2$ 。

将式(1)转换到 $\alpha\beta$ 坐标系下得到

$$U_{\alpha\beta} = E_{\alpha\beta} - L_0 \frac{dI_{\alpha\beta}}{dt} - R_0 I_{\alpha\beta} \quad (2)$$

式中: $E_{\alpha\beta} = [e_\alpha, e_\beta]^T$ ;  $U_{\alpha\beta} = [u_{\alpha\beta}, u_{\beta\beta}]^T$ ;  $I_{\alpha\beta} = [i_{\alpha\beta}, i_{\beta\beta}]^T$ 。

## 2 电流/功率协调控制策略

由于 MMC 交流系统与 MMC 换流器之间的变压器是 Y/ $\Delta$  连接,故忽略零序分量,将电网电压用正序分量和负序分量表示。MMC 交流侧的电压和电流可以表示为

$$\begin{cases} u_{sj} = u_{sj}^+ + u_{sj}^- \\ i_{sj} = i_{sj}^+ + i_{sj}^- \end{cases} \quad (3)$$

式中: $u_{sj}^+$ 、 $u_{sj}^-$ 为 MMC 交流侧电压的正、负序分量; $i_{sj}^+$ 、 $i_{sj}^-$ 分别为 MMC 交流侧电流的正、负序分量。

将式(3)经过 Clark 坐标变换后,可得 $\alpha\beta$ 坐标系下电网电压  $U_{\alpha\beta}$  和  $I_{\alpha\beta}$

$$\begin{cases} U_{\alpha\beta} = U_{\alpha\beta}^+ + U_{\alpha\beta}^- \\ I_{\alpha\beta} = I_{\alpha\beta}^+ + I_{\alpha\beta}^- \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{\alpha\beta}^+ = [u_{\alpha\beta}^+ \ u_{\beta\beta}^+]^T$ ,  $U_{\alpha\beta}^- = [u_{\alpha\beta}^- \ u_{\beta\beta}^-]^T$ ;  $I_{\alpha\beta}^+ = [i_{\alpha\beta}^+ \ i_{\beta\beta}^+]^T$ ,  $I_{\alpha\beta}^- = [i_{\alpha\beta}^- \ i_{\beta\beta}^-]^T$ 。

由瞬时功率理论可计算得到 MMC 交流侧的有功功率  $p$  和无功功率  $q$

$$\begin{cases} p = \frac{3}{2}(u_{s\alpha}i_{s\alpha} + u_{s\beta}i_{s\beta}) \\ q = \frac{3}{2}(u_{s\beta}i_{s\alpha} - u_{s\alpha}i_{s\beta}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $u_{s\alpha}$  和  $u_{s\beta}$  为  $\alpha\beta$  坐标系下的电压分量;  $i_{s\alpha}$  和  $i_{s\beta}$  为  $\alpha\beta$  坐标系下的电流分量。

将式(4)代入式(5)中可得电网瞬时有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} p_0 = \frac{3}{2}(u_{s\alpha}^+i_{s\alpha}^+ + u_{s\beta}^+i_{s\beta}^+ + u_{s\alpha}^-i_{s\alpha}^- + u_{s\beta}^-i_{s\beta}^-) \\ p_{2r} = \frac{3}{2}(u_{s\alpha}^+i_{s\alpha}^- + u_{s\beta}^+i_{s\beta}^- + u_{s\alpha}^-i_{s\alpha}^+ + u_{s\beta}^-i_{s\beta}^+) \\ q_0 = \frac{3}{2}(u_{s\beta}^+i_{s\alpha}^+ - u_{s\alpha}^+i_{s\beta}^+ + u_{s\beta}^-i_{s\alpha}^- - u_{s\alpha}^-i_{s\beta}^-) \\ q_{2r} = \frac{3}{2}(u_{s\beta}^-i_{s\alpha}^+ - u_{s\alpha}^-i_{s\beta}^+ - u_{s\beta}^+i_{s\alpha}^- + u_{s\alpha}^+i_{s\beta}^-) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $p_0$ ,  $p_{2r}$  为有功功率的直流量和二倍频波动分量;  $q_0$ ,  $q_{2r}$  为无功功率的直流量和二倍频波动分量。

传统电压外环控制要得到电流指令值,是分别以抑制负序电流和抑制功率波动为目标,整理式(6)计算得到电流指令值,两种控制目标不能同时实现。针对电流和功率分开控制的缺点,提出一种方案使两种控制目标能无缝切换,实现功率的灵活控制。根据正负序电压与正负序电流之间的矢量关系及功率计算公式,可以引入功率调节系数  $k_1$  将功率的波动分量相互补偿,进而整合得到电流/功率的协调控制时电流指令值公式<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} i_{s\alpha(p)} = \frac{2}{3} \frac{p_0[(u_{s\alpha}^+) + (k_1 u_{s\alpha}^-)]}{[(u_{s\alpha}^+)^2 + (u_{s\beta}^+)^2] + [(k_1 u_{s\alpha}^-)^2 + (u_{s\beta}^-)^2]} \\ i_{s\beta(p)} = \frac{2}{3} \frac{p_0[(u_{s\beta}^+) + (k_1 u_{s\beta}^-)]}{[(u_{s\alpha}^+)^2 + (u_{s\beta}^+)^2] + [(k_1 u_{s\alpha}^-)^2 + (u_{s\beta}^-)^2]} \\ i_{s\alpha(q)} = \frac{2}{3} \frac{q_0[(u_{s\beta}^+) - (k_1 u_{s\beta}^-)]}{[(u_{s\alpha}^+)^2 + (u_{s\beta}^+)^2] - k_1[(u_{s\alpha}^-)^2 + (u_{s\beta}^-)^2]} \\ i_{s\beta(q)} = \frac{2}{3} \frac{q_0[-(u_{s\alpha}^+) + (k_1 u_{s\alpha}^-)]}{[(u_{s\alpha}^+)^2 + (u_{s\beta}^+)^2] - k_1[(u_{s\alpha}^-)^2 + (u_{s\beta}^-)^2]} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $k_1$  为功率调节系数,变化范围为  $[-1, 1]$ ,当  $k_1 = -1$  时为抑制有功功率波动控制;  $k_1 = 1$  为抑制无功功率波动控制,  $k_1 = 0$  时为抑制负序电流控制;  $k_1$  在  $[-1, 1]$  范围内变化时可实现功率灵活控制。

### 3 低压限流设计

若在故障期间维持正常功率传输,根据式(7)可知,故障时,当以抑制功率波动为目标时,功率指令值不变,电压正序分量跌落,负序分量增加,MMC 换流器电流将大于正常工作时的电流,若电压降落幅值过大,不平衡电流也会增大,甚至大于开关器件的短路电流,将导致开关器件过流而烧毁,影响系统的正常运行,因此必须考虑在故障时增加低压限流环节,对功率指令值进行修正。由于 MMC-HVDC 主要用于有功功率的传输,为了保证故障期间有功功率的输送值,本文只对有功功率参考值进行修正,设置无功功率指令值为 0。

假定系统过流倍数为  $\lambda$ ,额定电流  $I_N^*$ ,工作电压的负序分量与额定电压的比值为  $h$ ,则

$$\begin{cases} I_N^* = \frac{p_0}{\sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}} \\ h = \frac{\sqrt{U_{s\alpha}^2 + (U_{s\beta}^-)^2}}{\sqrt{U_{s\alpha}^2 + U_{s\beta}^2}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $h$  为电网电压的不平衡度,当电网电压平衡时,负序分量为 0,电网电压的不平衡度为 0,电网电压不平衡时  $h$  的变化范围为  $[0, 1]$ ;  $\lambda$  为电网电压不平衡时故障电流幅值与正常额定电流之间的倍数关系。根据式(7)可以得到

$$(i_{s\alpha p}^*)^2 + (i_{s\beta p}^*)^2 = \frac{4p_0^2 \{ [(u_{s\alpha}^+) + (k_1 u_{s\alpha}^-)]^2 + [(u_{s\beta}^-) + (k_1 u_{s\beta}^-)]^2 \}}{9D^2} \quad (9)$$

式中:  $D = (u_{s\alpha}^+)^2 + (u_{s\beta}^+)^2 + k_1 [(u_{s\alpha}^-)^2 + (u_{s\beta}^-)^2]$ 。

电流的计算方法

$$I^* = \sqrt{(i_{s\alpha p}^*)^2 + (i_{s\beta p}^*)^2} \quad (10)$$

由于故障电流不能过大,通过设定  $I^* \leq \lambda I_N^*$ ,将故障电流控制在一定的范围内,将式(9)代入式(10)有

$$I^* = \frac{2p_0}{3} \sqrt{\frac{[(u_{s\alpha}^+) + (k_1 u_{s\alpha}^-)]^2 + [(u_{s\beta}^-) + (k_1 u_{s\beta}^-)]^2}{D^2}} \leq \frac{2p_0}{3} \sqrt{\frac{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2}{D^2}} \leq \frac{\lambda p_0}{\sqrt{u_{s\alpha}^2 + u_{s\beta}^2}} \quad (11)$$

整理式(11)得到功率修正公式为

$$\begin{cases} \lambda \geq \frac{2}{3[(1-h)^2 + k_1 h^2]}, P' = p_0 \\ \lambda \leq \frac{2}{3[(1-h)^2 + k_1 h^2]}, P' = \frac{3[(1-h)^2 + k_1 h^2] \lambda p_0}{2} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P'$  为有功功率修正值,当  $\lambda \geq 2/3[(1-h)^2 + k_1 h]$  时,系统不需要修正有功功率指令值,而当  $\lambda \leq 2/3[(1-h)^2 + k_1 h]$  时,则需要功率修正,以保证故障电流幅值不超过额定电流的  $\lambda$  倍。

#### 4 电流内环控制器设计

由于负序电压的存在,MMC网侧电流存在低次谐波,主要低次谐波分量是5,7次等奇次谐波,其中以5次电流谐波分量最大。为了对电流中交流信号进行无差控制,消除电流中的5次谐波,本文引入降阶矢量谐振控制器(ROVRC)来对参考指令电流信号进行调节。ROVRC的传递函数为

$$G_{\text{ROVRC}}(s) = \frac{(K_p s + K_r) \omega_c}{s - j\omega_r + \omega_c} \quad (13)$$

式中:  $K_p$  和  $K_r$  为增益系数;  $\omega_r$  为谐振频率;  $\omega_c$  为频率调节参数。

在式(13)的结构中,  $-j$  不易实现,且不利于降阶矢量谐振控制器的解耦,因此如何实现复数  $j$  为控制器设计的一大问题。复数  $j$  的实现方法有多种,比如利用一阶全通滤波器实现复数  $-j$  或者根据  $x_{\alpha\beta}$  的矢量关系:  $x_\alpha = jx_\beta, x_\beta = -jx_\alpha$ , 转换到  $s$  域中实现。本文利用二阶广义积分器实现复数  $-j$ 。二阶广义积分函数为

$$Q(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 - k\omega s + \omega^2} \quad (14)$$

式中:  $k$  为系统增益;  $\omega$  为谐振频率; 当  $\omega$  设置为电网电压基波角频率  $\omega = \omega_0$  时,有

$$\text{幅值: } |Q(s)| = \left| \frac{k\omega_0^2}{(j\omega_0)^2 + k\omega_0 j\omega_0 + \omega_0^2} \right| = 1$$

$$\text{相位: } \angle Q = -\frac{\pi}{2}$$

由此可以看出,取二阶广义积分器  $v$  为输入,  $qv'$  输出的幅值恒定为1,相角恒定为  $-90^\circ$ ,且不随频率变化。因此可以实现复数  $-j$ 。将式(13)中的  $-j$  用式(14)的二阶广义积分函数代替,可以得到改进后的降阶矢量控制器的开环传递函数

$$G_{\text{ROVRC}}(s) = \frac{(K_p s + K_r) \omega_c}{s + \frac{k\omega_0^2}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \omega_r - \omega_c} \quad (15)$$

由此可以得到降阶矢量谐振控制器原理图如图2所示。

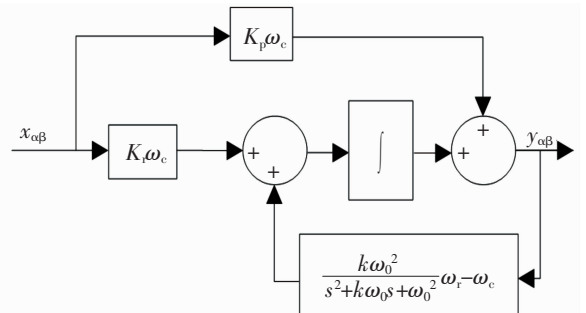


图2 ROVRC的控制结构图

Fig.2 ROVRC control structure diagram

图 3 是降阶矢量谐振控制器 ROVRC 传递函数的波特图。其中取  $K_p=0.000 1, K_i=1, \omega_c=4 \text{ rad/s}, k=1$ 。  $\omega_r$  分别取  $300, 500 \pi \text{ rad/s}$  和  $700 \pi \text{ rad/s}$  时的波特图, 从图 4 可以看出传递函数在频率  $150, 250 \text{ Hz}$  和  $350 \text{ Hz}$  的谐振频率处具有  $0 \text{ dB}$  的幅频特性和  $0^\circ$  的相位响应, 因此可以通过改变  $\omega_r$  的值消除电流中的特定谐波分量, 为此本文设置  $\omega_r$  为  $500 \pi \text{ rad/s}$ , 实现对 5 次谐波的无差跟踪。

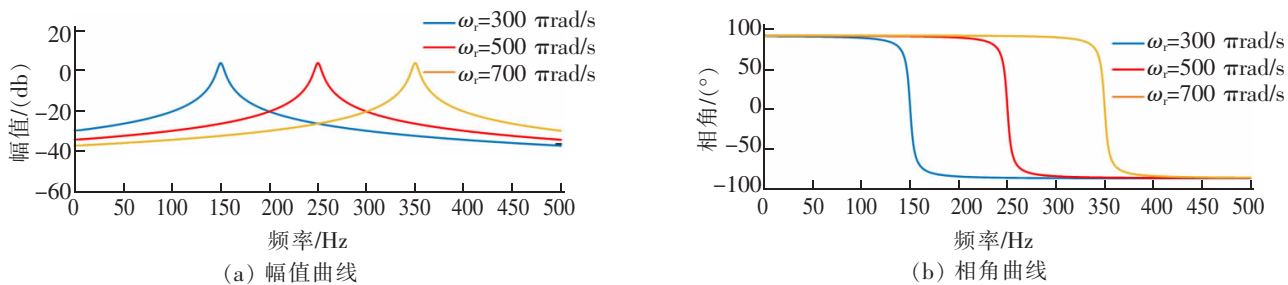


图 3 ROVRC 的幅频特性曲线

Fig.3 Amplitude-frequency characteristic curve ROVRC

### 5 仿真分析

为验证本文所提基于 PI-ROVRC 下的 MMC-HVDC 电网电压不平衡协调控制策略的有效性, 如图 5 所示, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了单端 MMC-HVDC 仿真模型, 表 1 是系统的主要仿真模型参数。

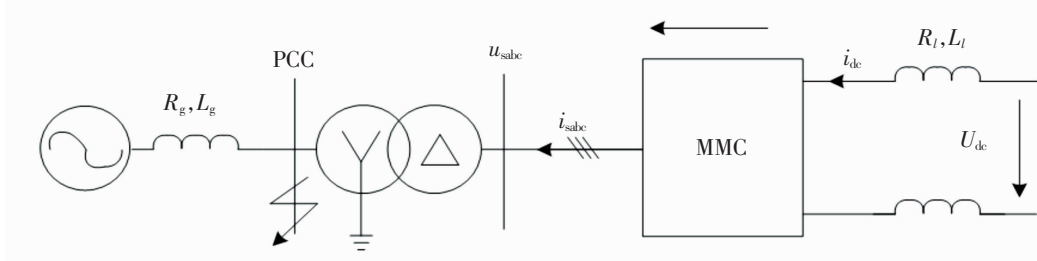


图 4 三相 MMC 仿真模型图

Fig.4 Three-phase MMC simulation model diagram

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
网侧额定电压/kV	35	子模块电容/ $\mu\text{F}$	10 500
额定容量/MVA	500	桥臂电感/mH	0.02
变压器漏抗/pu	0.1	桥臂电阻/ $\Omega$	0.05
直流电压/ kV	60	桥臂子模块数/个	50
变压器连接方式	Y/ $\Delta$	额定频率/Hz	50

图 5 是电网电压发生单相接地故障后的仿真波形,  $0.6 \text{ s}$  前系统处于正常运行状态, 三相电压、电流处于对称运行状态, 有功功率和无功功率分别稳定在  $30 \text{ MW}, 0 \text{ Mvar}$  处。  $0.6 \text{ s}$  后电网侧发生单相接地短路, 此时功率调节系数  $k_1$  从  $-1$  线性增加到  $1$ ,  $0.6 \text{ s}$  时刻调节系数  $k_1=-1$ , 此时为抑制有功功率二倍频波动, 可以看出有功功率几乎无波动, 而无功波动较大, 同时三相电流处于严重不对称的过流状态, 随着调节系数  $k_1$  从  $-1$  线性增加到  $0$ , 无功波动不断减小, 有功波动不断增大, 同时三相电流不对称程度不断减小, 当  $k_1=0$  时, 三相

电流处于对称运行状态,电流达到平衡,抑制了负序电流。当调节系数  $k_1$  从 0 线性增加到 1 时,三相电流的不平衡程度和有功功率波动不断增加,无功波动进一步减小,当  $k_1=1$  时,无功功率几乎无波动。通过上述仿真分析可以看出,通过调节系数  $k_1$  可以实现电流和功率之间的无缝切换,根据工程需求调节系数使电网运行在最优状态。

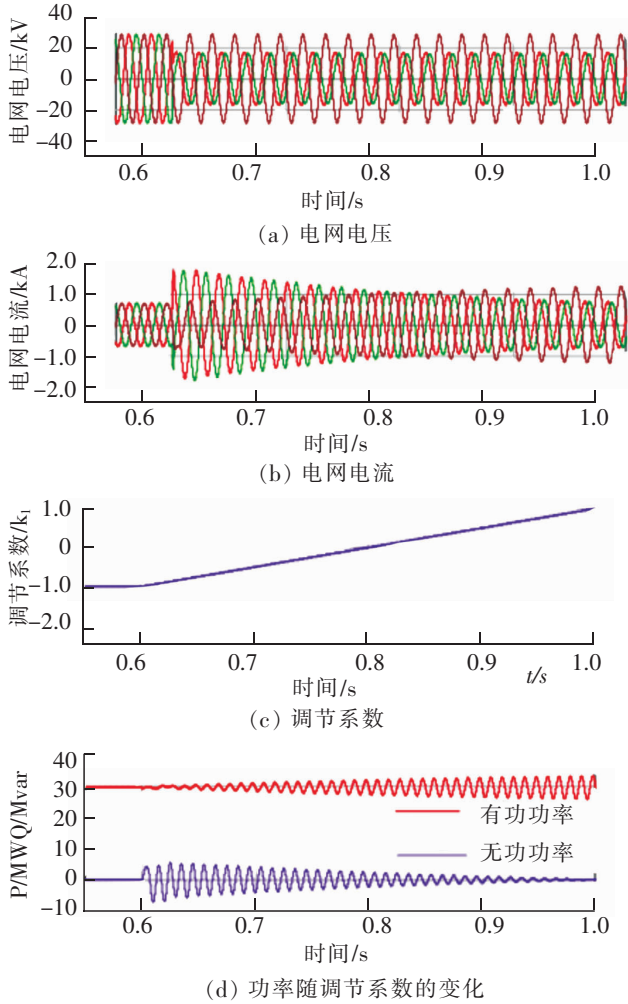


图 5 仿真结果 1  
Fig.5 Simulation result 1

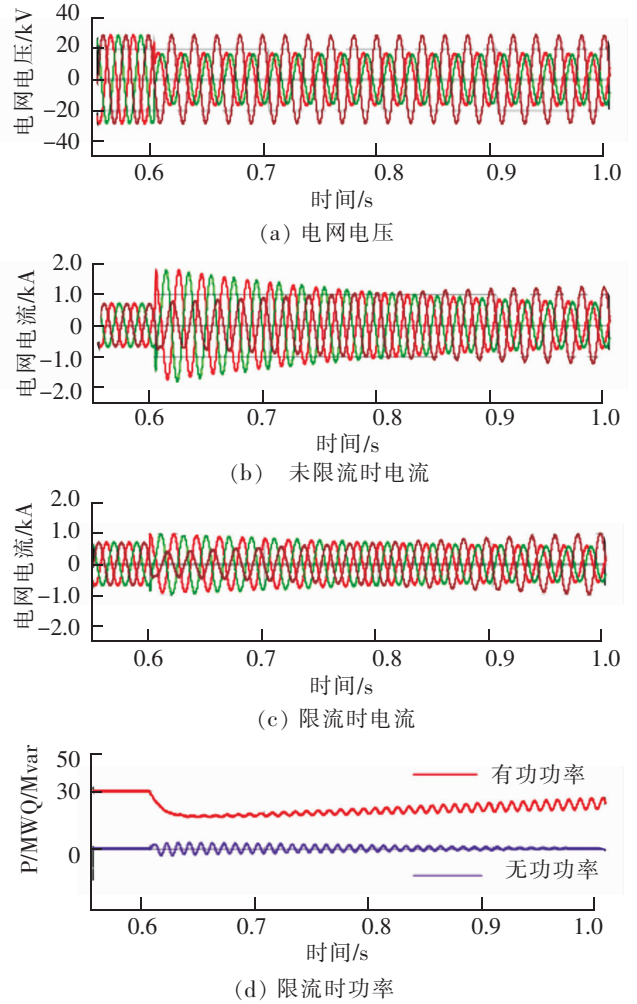


图 6 仿真结果 2  
Fig.6 Simulation result 2

从图 5 可以看出,当以抑制负序电流为目标时,功率波动较大,当以抑制功率二倍频波动为目标时,负序电流较大,电压严重不平衡时容易引起器件过流问题。图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)分别是 MMC-HVDC 交流侧发生单相短路故障前后限流装置对电网电流影响的仿真波形。0.6 s 时电网电压发生 A 相接地短路故障,导致 MMC 三相电网电压不平衡,由 MMC 功率分析可得,当抑制有功功率波动时,电流幅度变化最大,图 6 (b)与分析一致,不限流时,0.6~0.7 s 期间是抑制有功功率波动,故障电流幅值最大,约为额定电流幅值的 2 倍左右。图 6(c)是加入限流装置的仿真图形,设置允许的过流倍数  $\lambda=1.1$ ,即故障电流的幅值不超过额定电流幅值的 1.1 倍,对比仿真图 6(b)、图 6(c),加限流装置后,故障电流幅值明显减小。仿真结果表明低压限流装置实现了输出电流限幅的功能。

图 7(a)、图 7(b)分别是静止坐标系下以 PI-ROVRC 为内环控制器和旋转坐标系下以 PI 为内环控制器下的电网电压不平衡时电网侧电流频谱分析仿真图。对比图 7(a)、图 7(b)可以看出 PI-ROVRC 控制器下 5 次谐波分量较 PI 控制器下的 5 次谐波分量较小,由此验证了图 3 的分析结果,PI-ROVRC 能够减小 5 次谐波分量。

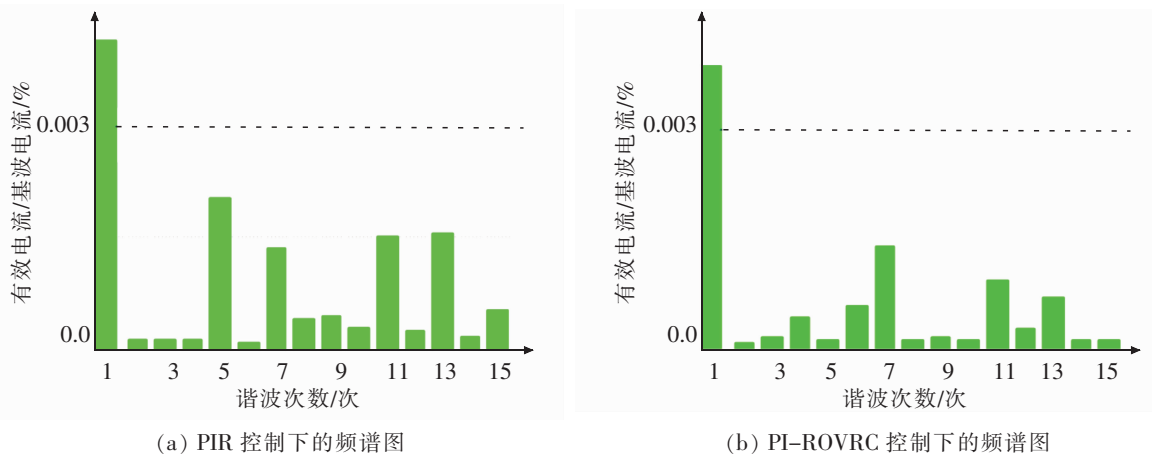


图7 仿真结果3

Fig.7 Simulation result 3

## 6 总结

本文通过分析电网电压不平衡下 MMC-HVDC 在静止坐标下电压、电流及功率特性,设计了低压限流环节,将 PI-ROVRC 引入电流内环控制,引入功率调节系数,实现了电流/功率在静止坐标系下的协调控制,最后搭建了仿真模型,对本文所提控制方案进行了验证。结果表明:低压限流装置通过有功功率修正能够将故障电流限制在要求范围内,防止器件过流损坏。PI-ROVRC 无差跟踪直流信号和交流信号,对电网频率有良好的适应性,能够消除电网电流中的特定低次谐波分量,提高了电流质量。协调控制策略无需电流和功率分开控制,简化了控制结构。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 宋平岗,吴继珍,邹欢. 电网电压不平衡时模块化多电平换流器直接功率补偿控制策略[J]. 高电压技术,2016,42(7):2184-2192.
- [3] 吴继珍. 基于 MMC-MTDC 的新型牵引供电系统建模与控制[D]. 南昌:华东交通大学,2016.
- [4] 杨海倩,王玮,荆龙,等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术,2016,40(1):40-46.
- [5] 刘英培,潘肫肫,栗然,等. 不对称电网电压下 MMC-HVDC 系统功率波动抑制策略研究[J]. 电测与仪表,2017,54(2):18-24.
- [6] 涂娟,汤宁平. 基于改进型 DSOGI-PLL 的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2350-2356.
- [7] 王国宁,孙鹏菊,杜雄,等. 电网电压不对称时锁频环同步信号检测方法的动态性能[J]. 电工技术学报,2015,30(22):163-171.
- [8] 王怀宝,沈虹,张莹,等. 基于改进自适应滤波器的电网同步技术[J]. 高电压技术,2014,40(11):3636-3641.
- [9] 杜雄,郭宏达,孙鹏菊,等. 基于 ANF-PLL 的电网电压基波正负序分离方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(27):28-35.
- [10] 宋平岗,吴继珍,邹欢. 不平衡电网电压下 MMC 的比例降阶谐振控制策略[J]. 电测与仪表,2017,54(2):38-45.
- [11] 赵新,金新民,周飞,等. 基于比例积分降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(19):84-92.
- [12] 杨莹,张兴,李明. 不平衡及谐波电网下基于多模块复数滤波器的电网阻抗检测方法[J]. 电源学报,2018,16(2):69-75.
- [13] 王逸超,欧名勇,陈燕东,等. 不平衡电压下并网逆变器的功率波动抑制与电流平衡协调控制方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(23):6981-6987.

- [14] 梁莹玉. 不对称电网电压下基于降阶矢量谐振器的 MMC-HVDC 直接功率控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7294-7303.
- [15] F WANG, J L DUARTE and M A M HENDRIX. Pliant active and reactive power control for Grid-Interactive converters under unbalanced voltage dips[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1511-1521.

## On MMC-HVDC Coordinated Control Strategy under Grid Voltage Imbalance

Xiao Dan, Zhou Penghui, Song Pinggang, Yang Shengdi, Tan Jinghui

(College of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In view of the grid voltage imbalance under HVDC transmission, the traditional control strategy adopts separate suppression of negative sequence current and power fluctuation, which increases the difficulty of control and reduces the quality of the grid. Therefore, for the problem of grid voltage imbalance, the power adjustment factor was firstly introduced to realize the coordinated control of current and power. Furthermore, the proportional reduced-order vector resonance controller (PI-ROVRC) was used as the current inner loop control. The proportional-integral controller realized the static-free control of the DC component of the grid current, and the ROVRC performed the tracking control of the AC component in the grid current without difference, thereby improving the current quality of the MMC AC side. The overcurrent problem on the AC side was further discussed when the grid voltage was unbalanced. The method for correcting the active power command value was applied to limit the current amplitude at the fault to a specified range, improving the dynamics and reliability of the system. Finally, the simulation was verified by PSCAD/EMTDC simulation platform. The results showed that the proposed control strategy was consistent with the simulation, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed scheme.

**Key words:** modular multilevel converter (MMC); grid voltage imbalance; coordinated control; low voltage current limiting; proportional reduced order vector resonant controller (PI-ROVRC)