

抑制 MMC 高频谐振的功率同步控制方法研究

游广增¹, 刘鸿超², 芮智², 严正^{2*}

(1. 云南电网有限责任公司电网规划建设研究中心, 云南省 昆明市 650011;

2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

Research on Power Synchronization Control Method to Suppress MMC High Frequency Resonance

YOU Guangzeng¹, LIU Hongchao², RUI Zhi², YAN Zheng^{2*}

(1. Power Grid Planning and Construction Research Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, Yunnan Province, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University),
Minhang District, Shanghai 200240, China)

Abstract: To suppress the high-frequency resonance of MMC-HVDC (modular multilevel converter based high voltage direct current), a control strategy of switching vector current control to power synchronous control is proposed. The mechanism of high-frequency resonance in MMC under current vector control is analyzed firstly, and the switch from vector control to power synchronous control is realized under high-frequency resonance. Then the high-frequency impedance of MMC under power synchronization control is obtained by the frequency scanning method. To judge the possibility of high-frequency resonance, the amplitude-frequency characteristics of power grid impedance and MMC high-frequency impedance are analyzed by system stability criterion. Finally, the effectiveness of power synchronization control to suppress MMC high-frequency resonance is verified by simulation.

Keywords: modular multilevel converter (MMC); high-frequency resonance suppression; power synchronization control; frequency scanning

摘要: 针对模块化多电平换流器型柔性直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)系统中频发的高频谐振现象, 提出将矢量电流控制(vector current control, VCC)切换为功率同步控制(power synchronization control, PSC)以抑制其高频谐振的控制策略。首先分析了矢量电流控制下MMC产生高频谐振的机理, 并实

现了高频谐振现象下由矢量控制到功率同步控制的切换。然后, 通过频率扫描得到MMC在功率同步控制下的高频阻抗, 并通过系统稳定性判据对电网阻抗和MMC高频阻抗的特性进行分析, 从而判断系统发生高频谐振的可能性。最后, 通过仿真分析验证了功率同步控制对抑制MMC高频谐振的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 高频谐振抑制; 功率同步控制; 频率扫描

0 引言

为解决传统化石能源开发利用带来的气候变化与环境污染问题, 国际社会已经对全球碳中和转型形成了共识^[1-3], 因此大力发展新能源发电已成为必然趋势^[4-5]。近年来, 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统在实际工程中的应用越来越广泛^[6-8]。然而, 由于MMC的开关数目多, 中高频谐振现象频发, 严重影响了电网系统的稳定运行。因此, 如何抑制柔性直流输电系统的中高频谐振以保障电网的安全运行, 已成为亟需解决的问题^[9-10]。

目前国内外电网均已出现高频谐振现象。例如, 西班牙-法国联网工程的交流系统网架拓扑结构变化, 使电网与MMC阻抗存在高频谐振交点, 发生了频段在1.6 Hz的高频谐振事件^[11]; 鲁西背靠背工程的某线路因故障与鲁西换流站断开, 引发了1271 Hz的高频谐振^[12]; 渝鄂背靠背工程在鄂侧和渝侧分别出现过主要频率为1810 Hz和700 Hz的高频谐振^[13]; 德国海上风电柔直工程在送出时出现了250~350 Hz的谐振, 导致

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107113); 南方电网云南电网有限责任公司科技项目(059100KK52190014)。

National Natural Science Foundation of China (52107113);
Science and Technology Project of China Southern Power Grid
Yunnan Power Grid Co., Ltd. (059100KK52190014).

系统停运长达半年^[14]。从上述柔直工程发生的高频谐振事件可以看出, 高频谐振现象对交流电网产生了严重冲击。

MMC-HVDC系统出现高频谐振的原因主要分为两个方面: 一方面是由于电网网架拓扑的改变与MMC形成高频谐振交点, 进而引发高频振荡; 另一方面是由于MMC的子模块数量多, 其开关切换频繁且控制链路延时较长, 导致MMC在高频段产生负阻尼, 进而引发系统高频振荡^[11-14]。

目前抑制高频谐振的常用方法是在主控制环节附加滤波器以提高MMC在中高频段的阻尼。文献[15]建立了交、直流侧系统的阻抗模型, 并指出交流侧阻抗产生负阻尼主要是由于控制链路延时、内环控制参数和桥臂电感等因素造成的; 文献[16]忽略了锁相环、电压外环, 建立了简化MMC高频段的阻抗模型, 并在电压前馈环节附加低通滤波器以抑制其高频谐振; 文献[17]对比了在电压前馈环节附加不同类型的滤波器对高频谐振的抑制效果; 文献[18]在MMC原控制结构的基础上增加了高频谐波电流环, 改变了其特定高频下的阻抗, 但该方法只适用于特定频率的谐振, 无法抑制其他高频段谐波。

基于上述分析, 本文首先通过阻抗法分析了MMC产生高频谐振的机理, 提出了一种在电网出现高频谐振现象时的控制切换策略, 即在系统发生高频谐振时, 其MMC控制方法由原本的矢量电流控制(vector current control, VCC)切换为功率同步控制(power synchronization control, PSC)以抑制高频谐振。功率同步控制在正常情况下无需锁相环, 适用于接入弱电网MMC-HVDC系统。同步控制既不影响系统的正常运行, 又可以在系统发生高频谐振时投入以达到抑制效果。最后, 本文通过仿真分析验证了功率同步控制的有效性。

1 矢量电流控制下MMC的高频谐振机理

图1为单端MMC输电系统的拓扑结构图。图中, u_g 为交流系统电压; R_g 、 L_g 分别为交流系统的电阻、电感; R_T 、 L_T 分别为交流系统与MMC之间变压器的等效电阻和等效电感; i_j ($j = a, b, c$)为交流电流, i_{pj} 、 i_{nj} 分别为MMC上、下桥臂电流; L_{arm} 为桥臂电感; U_{dc} 、 I_{dc} 分别为直流侧电压、电流; 子模块采用半桥结构, 其中 u_c 为子模块电容电压, u_{SM} 、 i_{SM} 分别为子模块电压、电流。

1.1 MMC并网稳定性判据

在图1所示的直流输电系统中, 将电网、换流器分别在公共连接点(point of common coupling, PCC)端口处做频域下的戴维南等效、诺顿等效, 可以得到如图2所示的变流器联网的频域等效电路。

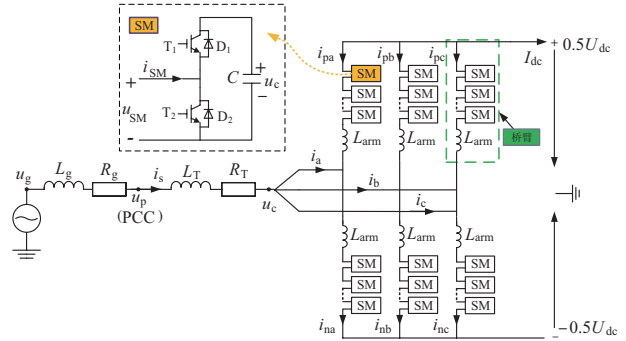


图1 单端MMC输电系统的拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of single-terminal MMC power transmission system

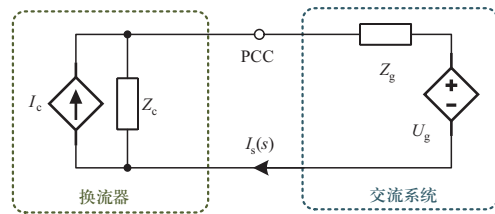


图2 换流器并网的阻抗模型

Fig. 2 Impedance model of converter connected to grid

其中, Z_c 和 Z_g 分别为换流器和交流系统的阻抗, $Z_g = R_g + sL_{eq}$, $L_{eq} = L_T + L_{arm}/2$ 。由图2可求得并网电流:

$$I_s(s) = \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_c(s)}} \left[I_g(s) - \frac{U_g(s)}{Z_c(s)} \right] \quad (1)$$

当换流器在强电网(即电网阻抗 $Z_g(s)$ 为0)时, 并网电流为

$$I_{s0}(s) = I_g(s) - \frac{U_g(s)}{Z_c(s)} \quad (2)$$

因此, 换流器接入系统的稳定性判据分为两条: ①换流器在强电网下本身的稳定, 即 $I_{s0}(s)$ 稳定; ②换流器和电网阻抗的幅频特性(即 $Z_g(s)/Z_c(s)$)满足Nyquist稳定性判据。一般实际工程中的变流器参数设计合理, 条件①都能满足, 因此只需考虑条件②是否满足。若 $Z_g(s)$ 和 $Z_c(s)$ 的幅频特性曲线没有交点或有交点但在交点频率下 $Z_c(s)$ 和 $Z_g(s)$ 的相位差小于 180° , 则换流器并网系统稳定, 否则系统不稳定。

由系统稳定判据可得到高频谐振判据: $Z_g(s)$ 和 $Z_c(s)$ 的幅频特性曲线在高频段有交点, 且在交点频率下, $Z_c(s)$ 和 $Z_g(s)$ 相位差大于 180° 。该判据只需对比电网和 MMC 正序阻抗的幅频特性曲线, 因此电网和 MMC 的阻抗仅考虑其正序阻抗, 不适用于考虑耦合阻抗和负序阻抗的二阶阻抗模型。因此, 该稳定性判据适用于单回柔性直流且仅考虑正序阻抗的换流器。

1.2 MMC 高频谐振机理分析

MMC 子模块数量多, 实际运行条件复杂, 存在导致高频谐波产生的诸多因素, 如 MMC 的模块电平数、控制特性、PLL 控制方式、电压环控制和电流环控制等。外环控制和锁相环控制对高频谐波的影响不大, 因此高频阻抗主要与电流内环控制和解耦控制部分相关。根据以上分析, 以 d 轴为例, 忽略 MMC 的外环控制和锁相环控制, 只考虑内环电流控制和电压前馈控制的简化控制策略如图 3 所示^[19-20]。

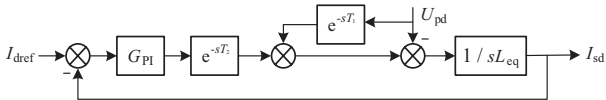


图 3 MMC 简化控制框图

Fig. 3 Simplified control block diagram of MMC

其中, I_{dref} 为内环电流参考值; L_{eq} 为 MMC 交流等效电感; I_{sd} 为输出电流; U_{pd} 为 PCC 点 d 轴电压; e^{-sT_1} 为网压前馈延时环节; e^{-sT_2} 为电流测量延时环节; $G_{PI} = k_p + k_i/s$ 为 PI 控制器, 其中 k_p 为比例系数, k_i 为积分系数。输出电流为

$$I_{sd} = \frac{G_{PI} e^{-sT_2}}{sL + G_{PI} e^{-sT_2}} I_{dref} - \frac{U_{pd}}{\frac{sL + G_{PI} e^{-sT_2}}{1 - e^{-sT_1}}} \quad (3)$$

根据式 (3) 和图 2, 可以求出 MMC 并网阻抗模型, 其中增益 A 和 MMC 阻抗 Z_{MMC} 的计算公式如下:

$$\begin{cases} A = \frac{G_{PI} G_{T_2}}{sL + G_{PI} G_{T_2}} \\ Z_{MMC} = \frac{sL + G_{PI} G_{T_2}}{1 - G_{T_1}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $G_{T_1} = e^{-sT_1}$, $G_{T_2} = e^{-sT_2}$ 。根据以上分析, MMC 高频阻抗可以表示为

$$Z_{MMC}(s) = \frac{sL + \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) e^{-sT_2}}{1 - e^{-sT_1}} \quad (5)$$

根据并网稳定性判据可知, 高频谐振是由于交流电网和 MMC 换流器的阻抗特性不同引起的。正常工

况下二者在基频下均呈现感性, 而当交流系统或换流器在高频时由感性变为容性, 此时感性元件和容性元件相连, 系统容易发生高频谐振。本文中交流系统随着频率变大, 其特性由感性变为容性, 而 MMC 换流器在该过程中一般呈现感性。

2 功率同步控制的原理

功率同步控制是一种基于同步发电机自同步原理的控制方法^[21]。以图 4 所示的系统为例, 该系统由两台同步电机 G 与 M 组成, 其中 G 为发电机, M 为电动机, 忽略线路电阻与同步电机的阻尼作用, 设线路电抗为 X 。

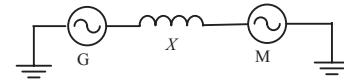


图 4 同步电机的同步机理示意图

Fig. 4 Synchronization mechanism of synchronous motor

当系统稳定运行时, 设 E_1 与 E_2 分别为 G 与 M 的内部电动势, 且 E_1 与 E_2 保持不变, 则由 G 向 M 传输的电磁功率和转子运动方程可表示为

$$P = \frac{E_1 E_2 \sin \theta}{X} \quad (6)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (7)$$

式中: θ 是 E_1 与 E_2 之间的相角差; J 是同步电机的转动惯量; ω_m 是转子角速度; T_e 是同步电机的电磁转矩。

通过上述公式可知, 当发电机 G 的机械转矩 T_{m1} 短暂增加后恢复到初始值, 其转子的机械角将增大。转子机械角增大必然引起发电机 G 的电动势 E_1 相对相角的增大。而此时电动机 M 的电动势相角不变, 因此 G 与 M 之间的相角差增大, 由式 (7) 可知系统传输的电磁功率将增大, 电动机的电磁转矩 T_e 将增加。假设电动机的负载转矩 T_{m2} 不变, 则其转子角速度将增加。此时 E_2 的相角也将增大, 因此发电机和电动机之间的相角差逐渐减小, 直至电动势恢复至初始状态, 系统重新稳定。

当一个同步电机电动势的相角发生变化时, 其他同步电机将跟随其发生变化以维持它们之间的同步性。本文采用功率同步控制将 MMC 等效为电动机, 使其满足并网稳定性判据, 以此提高 MMC 并网时的稳定性。

MMC 并网等效模型如图 5 所示。其中, 受控源 U_c 为 MMC 交流侧电压幅值; L_T 为 PCC 点与 MMC 交流侧之间联结变压器的漏抗; U_g 、 R_g 和 L_g 分别为交流系统

的电压幅值、电阻和电感； U_p 为PCC点电压幅值。所有参数均为折算到联结变阀侧的值。

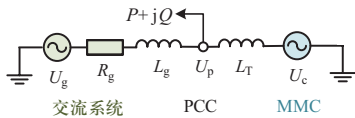


图5 MMC并网等效模型

Fig.5 Equivalent model for grid connection of MMC

一般交流系统中 $R_s \ll X_s$ ，故可将电阻 R_s 忽略。其中 $X_g = \omega_1 L_g$ ， $X_T = \omega_1 L_T$ ， ω_1 为电网额定角频率。则从PCC端向电网送出的有功功率 P 和无功功率 Q 分别为

$$\begin{cases} P = \frac{3U_c U_p}{2X_T} \sin \delta \\ Q = \frac{3U_p (U_c - U_p \cos \delta)}{2X_T} \end{cases} \quad (8)$$

式中： θ_p 和 θ_c 分别为 U_p 和 U_c 交流侧电压 U_g 的相位角， $\delta = \theta_c - \theta_p$ 。输电系统中 $\delta \approx 0$ ，因此式(8)可简化为

$$\begin{cases} P = \frac{3U_c U_p}{2X_T} (\theta_c - \theta_p) \\ Q = \frac{3U_p (U_c - U_p)}{2X_T} \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可看出，可以通过控制 (θ_c, U_c) 控制 (P, Q) ，且稳态时 $\theta_c - P$ 和 $U_c - Q$ 均近似为线性关系。因此控制策略^[22]可表示为

$$\begin{cases} \theta - \theta_0 = \frac{K_p}{s} (P_{ref} - P) \\ U_c - U_{c0} = K_Q (Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)第一个公式可知，有功误差是经过系数 K_p 放大积分之后，与参考相位 θ_0 叠加后得到的参考电压相位。但是，有功调功角的纯积分响应很慢，无功调压的比例环节有稳态误差，因此全部替换为PI控制。改进后的功率同步控制策略如图6所示，有功功率误差经过截止频率为 ω_x 的滤波器后通过比例积分控制得到的相角与参考相位叠加得到参考电压的相角，而参考电压幅值是由无功功率误差经过滤波器后通过比例积分控制得到的电压幅值，再与换流器交流侧稳态电压幅值叠加得到参考电压的幅值。通过上述功率

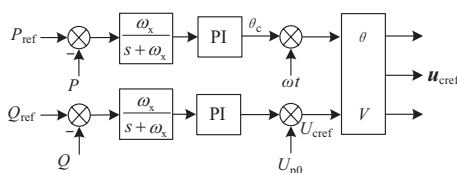


图6 功率同步控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of power synchronization control

同步控制得到了参考电压的幅值和相角，因此B相和C相参考电压分别滞后和超前A相120°。

3 仿真实证

为了验证功率同步控制抑制MMC高频谐振的有效性，在PSCAD中搭建MMC仿真模型，控制链路延时设置为450 μs，电网阻抗角为88.3°，桥臂电感为200 mH，联接变等效电感为115.7 mH，直流侧参考电压为400 kV。

3.1 矢量电流控制下MMC的高频谐振现象

当MMC采用矢量电流控制时，在MMC和交流电网之间，串联理想的小谐波电压源，向MMC交流侧注入谐波电压，然后在一系列频率中重复进行仿真，获取扫频阻抗曲线。MMC和电网的阻抗特性如图7所示。

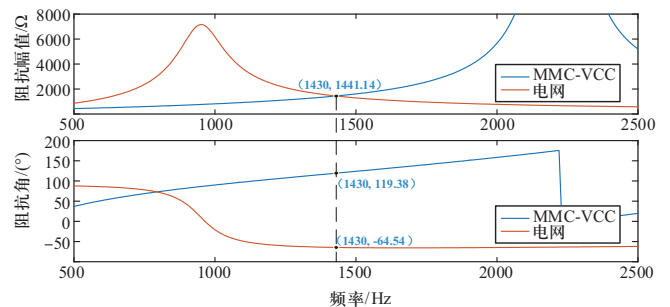


图7 矢量电流控制下电网和MMC的阻抗特性对比

Fig.7 Comparison of grid and MMC impedance characteristics under VCC

可以看出，MMC阻抗与电网阻抗在1430 Hz处相交，此频率下的MMC相角为119.38°，电网相角为-64.54°，MMC阻抗和电网阻抗特性曲线交点处相位差大于180°，因此发生谐振，其PSCAD仿真波形如图8和图9所示。

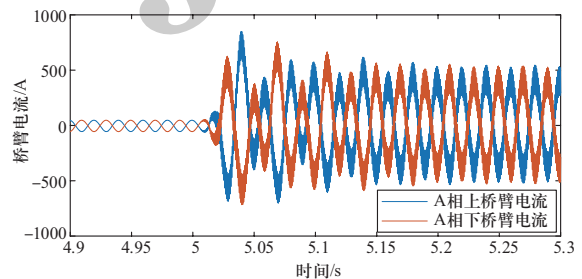


图8 矢量电流控制下的A相桥臂电流仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of A-phase bridge arm current under VCC

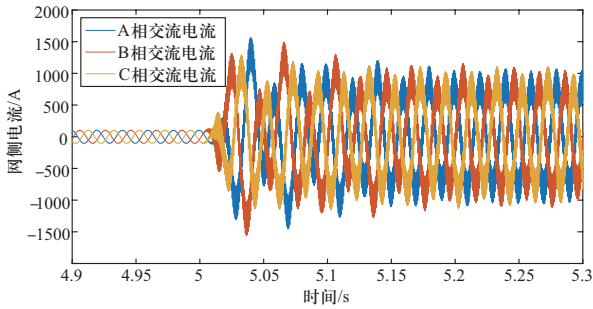


图 9 矢量电流控制下的网侧电流仿真波形
Fig. 9 Simulation waveform of grid current under VCC

对图8和图9的仿真数据进行高频分量提取, 可以发现, 5 s时RC电路投入^[6], MMC的电流发生了1348 Hz的高频谐振, 验证了扫频结果。

3.2 功率同步控制下MMC的高频谐振现象

将MMC控制方法由矢量电流控制变成功率同步控制后, 电网和MMC扫频阻抗特性对比如图10所示。可以看出, 扫频阻抗曲线幅值与电网阻抗幅值有两个交点, 对应的谐振频率分别为920 Hz、1570 Hz, 从相角曲线可以看出二者对应的相角差均小于180°, 满足系统稳定的条件。

功率同步控制下的PSCAD仿真模型中RC电路仍在5 s时并联到电网, 可得到桥臂电流和交流侧电流的仿真波形, 如图11和图12所示。可以看出, 采用功率

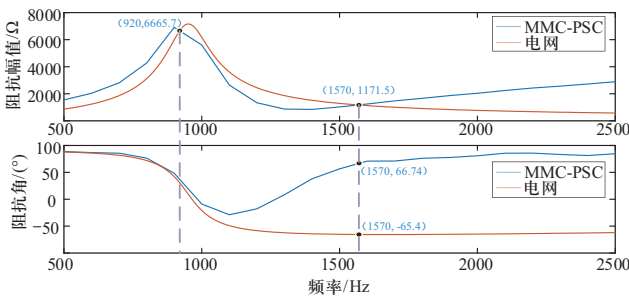


图 10 功率同步控制下电网和MMC的阻抗特性对比
Fig.10 Comparison of grid and MMC impedance characteristics under PSC

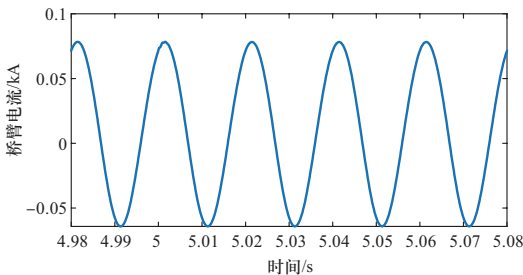


图 11 PSC下的桥臂电流仿真波形
Fig. 11 Simulated waveform of arm current under PSC

同步控制的MMC, 在系统发生高频谐振时, 系统的各电气量波形同时也不会出现高次谐波, 该控制本身可以抑制高频谐振的出现。

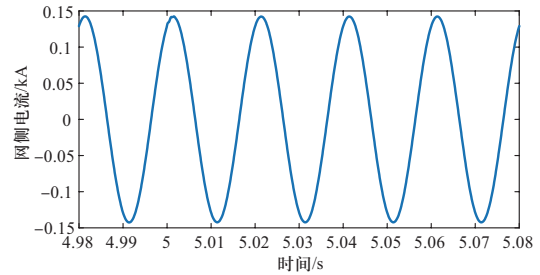


图 12 PSC下的网侧电流仿真波形
Fig. 12 Simulation waveform of grid current under PSC

3.3 MMC高频谐振时矢量电流控制向功率同步控制的切换

从图13可以看出, 当MMC控制策略由矢量电流控制切换至功率同步控制时, 其阻抗特性发生了明显变化。阻抗幅值和相角在500~1200 Hz范围内更接近电网阻抗特性, 在1200~2500 Hz范围内幅值并没有出现因控制延时引起的尖峰和相角突变, 其阻抗幅值上升平缓, 且阻抗幅值和相角都减小。阻抗幅值减小使得MMC和电网幅值交点处频率变大, 而相角减小使得二者相角差减小, 其稳定相角裕度增大, 系统稳定性提高。

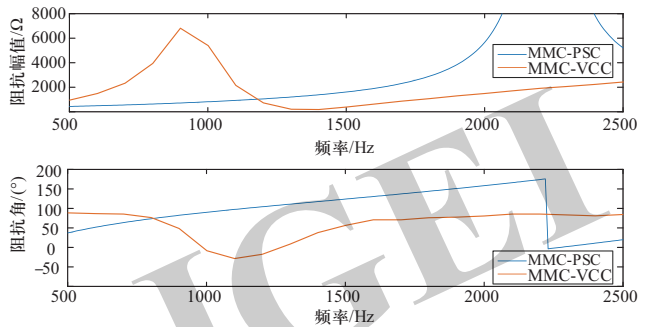


图 13 VCC和PSC下的MMC阻抗特性
Fig. 13 Impedance characteristics under VCC and PSC

在正常工况下, MMC通过矢量电流策略控制, 5 s时系统发生高频谐振, 此时网侧电流和有功功率均存在高频分量, 如图14和图15所示。由图16 (a)可以看出, 此阶段产生了1348 Hz的高频谐振, 之后在5.3 s时将矢量电流控制切换为功率同步控制, 有功参考功率为系统正常运行时交流侧有功功率, 无功参考功率设置为0。经过一段时间后, 系统稳定。从图16 (b)

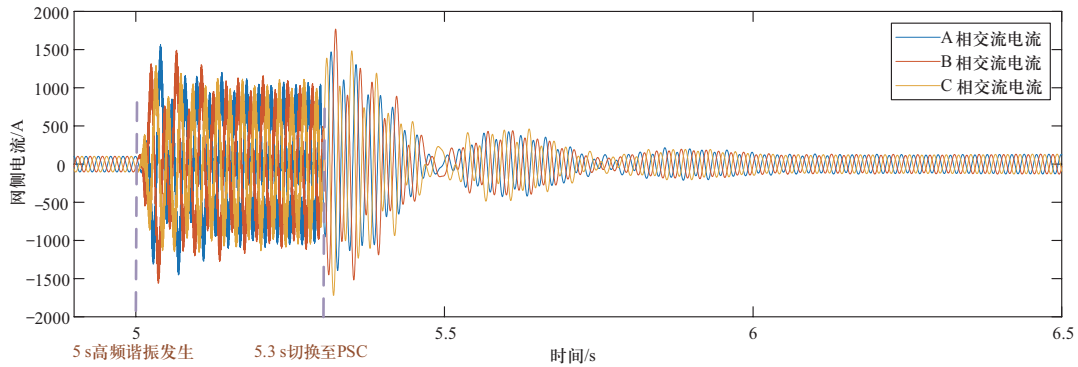


图 14 网侧电流仿真波形

Fig. 14 Simulation waveform of grid current

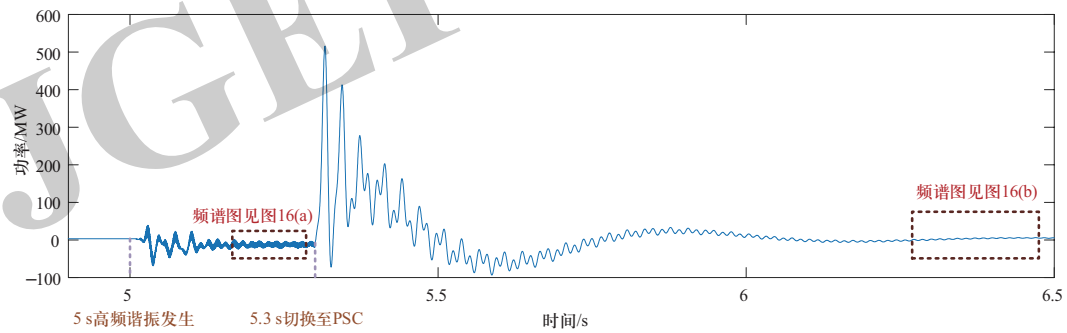


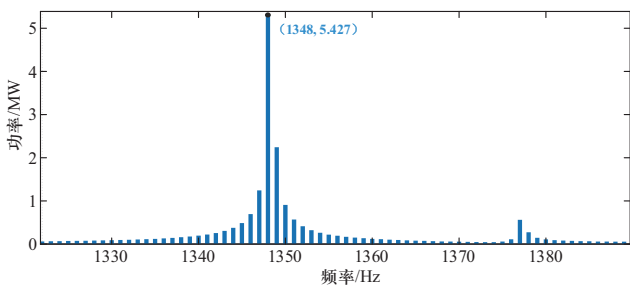
图 15 有功功率仿真波形

Fig. 15 Simulation waveform of active power

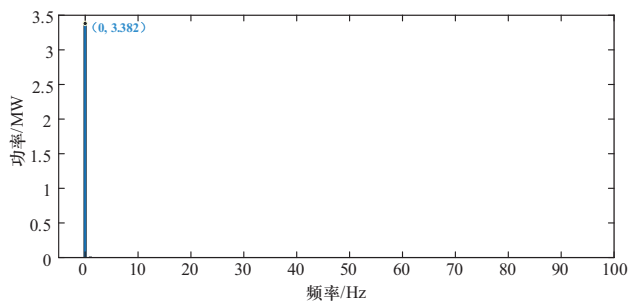
可以看出，网侧电流的高频分量被抑制，有功功率只含有直流分量，MMC矢量电流控制切换至功率同步控制达到了抑制系统高频谐振的效果。

4 结论

本文分析了MMC并网系统稳定性的判断方法，并通过阻抗扫描的方法分别得到矢量电流控制和功率同步控制的MMC阻抗特性曲线。在拓扑参数一致的情况下，矢量电流控制的MMC并网系统会发生高频谐振，而功率同步控制下的MMC并网系统不会发生高频谐振，因此MMC发生高频谐振时将矢量电流控制切换至功率同步控制，保障系统在发生高频谐振时可以继续稳定运行。最后通过PSCAD仿真验证了功率同步控制方法对抑制高频谐振的有效性。



(a) 高频谐振时



(b) 正常工况下

图 16 有功功率的频谱分析图

Fig. 16 Spectrum analysis diagram of active power

参考文献

[1] 张宇宁, 王克, 向月皎, 等. 碳中和背景下美国回归全球气候治理的行动、影响及中国应对[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 560-567.
ZHANG Yuning, WANG Ke, XIANG Yuejiao, et al. The US returning to global climate governance in context of carbon neutrality: action, impacts and China's response[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 560-567(in Chinese).

[2] 关照宇, 赵文博. 双向互动: 当“碳中和”遭遇中美战略竞争[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 542-548.

- GUAN Zhaoyu, ZHAO Wenbo. Double movement—the encounter of carbon neutrality and China-U.S. strategic competition[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 542-548(in Chinese).
- [3] 史谢虹, 周鹏超, 张锐, 等. 碳中和背景下欧亚地区国家能源转型的动向与展望[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(6): 568-574.
SHI Xiehong, ZHOU Pengchao, ZHANG Rui, et al. Trends and prospects of energy transition in Eurasia in context of carbon neutrality[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 568-574(in Chinese).
- [4] 张兴, 李明, 郭梓暄, 等. 新能源并网逆变器控制策略研究综述与展望[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(5): 506-515.
ZHANG Xing, LI Ming, GUO Zixuan, et al. Review and perspectives on control strategies for renewable energy grid-connected inverters[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(5): 506-515(in Chinese).
- [5] 袁艺嘉, 孔明, 孙宝宝, 等. 海上换流站直流侧暂态过压应力抑制策略有效性分析[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(6): 602-614.
YUAN Yijia, KONG Ming, SUN Baobao, et al. Analysis on the effectiveness of suppression strategies for transient overvoltage stress on the DC side of offshore converter station[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 602-614(in Chinese).
- [6] 石吉银, 刘景远, 许军, 等. 基于多通道信号分离器的 MMC 网侧背景谐波电流抑制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(23): 106-113.
SHI Jiyin, LIU Jingyuan, XU Jun, et al. Suppression strategy for an MMC grid-side background harmonic current based on a multi-channel signal separator[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(23): 106-113(in Chinese).
- [7] 夏长江, 韩民晓, 耿治, 等. MMC 子模块故障后线电压恢复容错控制策略[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(4): 2-9.
XIA Changjiang, HAN Minxiao, GENG Zhi, et al. Fault-tolerant control strategy of line voltage recovery after MMC sub-modules fault[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(4): 2-9(in Chinese).
- [8] HE J H, CHEN K A, LI M, et al. Active injection protection scheme for flexible HVDC grids based on amplitude of input impedance[J]. *Global Energy Interconnection*, 2021, 4(6): 532-542.
- [9] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. *电网技术*, 2018, 42(4): 1117-1123.
YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1117-1123(in Chinese).
- [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.
GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(1): 19-29(in Chinese).
- [11] 杨诗琦, 刘开培, 秦亮, 等. MMC-HVDC 高频振荡问题研究进展[J]. *高电压技术*, 2021, 47(10): 3485-3496.
YANG Shiqi, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Research progress of high frequency oscillation in MMC-HVDC[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3485-3496(in Chinese).
- [12] 郭琦, 郭海平, 黄立滨. 电网电压前馈对柔性直流输电在弱电网下的稳定性影响[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(14): 139-144.
GUO Qi, GUO Haiping, HUANG Libin. Effect of grid voltage feedforward on VSC-HVDC stability in weak power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(14): 139-144(in Chinese).
- [13] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 157-164.
GUO Xianshan, LIU Bin, MEI Hongming, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 157-164(in Chinese).
- [14] BUCHHAGEN C, RAUSCHER C, MENZE A, et al. BorWin1-First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids[C]//*International ETG Congress 2015; Die Energiewende-Blueprints for the new energy age*. Bonn, Germany.
- [15] 代锋, 王钢, 曾德辉, 等. MMC-HVDC 输电系统中高频阻抗建模及谐振机理分析[J]. *电网技术*, 2022, 46(6): 2356-2372.
DAI Feng, WANG Gang, ZENG Dehui, et al. Medium- & high-frequency impedance modeling and resonance mechanism analysis of MMC-HVDC transmission system[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(6): 2356-2372(in Chinese).
- [16] ZOU C Y, RAO H, XU S K, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(12): 10157-10168.
- [17] 陈威, 汪娟娟, 叶运铭, 等. 柔性直流输电系统交流侧中高频谐振附加阻尼抑制措施[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(18): 151-161.
CHEN Wei, WANG Juanjuan, YE Yunming, et al. Additional damping suppression measures for medium- and high-frequency resonance on AC side of MMC-HVDC transmission system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(18): 151-161(in Chinese).
- [18] 李凌, 张野, 梁振成, 等. 模块化多电平换流器的主动谐波抑制策略[J]. *广东电力*, 2020, 33(3): 34-41.
LI Ling, ZHANG Ye, LIANG Zhencheng, et al. Active

harmonic oscillation suppression strategy for modular multilevel converter[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(3): 34-41(in Chinese).

- [19] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [20] 杜东冶. 模块化多电平换流器高频谐振抑制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- [21] 刘炜. 适用于VSC-HVDC连接极弱受端交流电网的功率阻尼同步控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [22] 刘炜, 郭春义, 赵成勇, 等. 一种适用于MMC-HVDC连接极弱受端交流电网的功率阻尼同步控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4647-4656.
- LIU Wei, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, et al. Power damping synchronization control for MMC-HVDC connected to an extremely weak receiving AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4647-4656(in Chinese).

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-08-22。



游广增

作者简介:

游广增(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析, E-mail: misteryou@qq.com。

刘鸿超(1996), 男, 硕士, 研究方向为电力电子化电力系统电磁暂态仿真、稳定性分析, E-mail: hongchaoliu@sjtu.edu.cn。

芮智(1996), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定性, E-mail: ruizhi1996@sjtu.edu.cn。

严正(1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析及智能电网。通信作者, E-mail: yanz@situ.edu.cn。

(责任编辑 张宇 翁宇威)

JGEEI