

引用格式: 兰月, 王俊芳, 窦宇宇, 等. 一种抑制风电送出直流 MMC 内部振荡的零序电流控制策略研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 234-242.
Citation: LAN Yue, WANG Junfang, DOU Yuyu, et al. Research on zero sequence current control strategy for suppressing internal oscillation of DC MMC[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 234-242.

一种抑制风电送出直流 MMC 内部振荡的 零序电流控制策略研究

兰月¹, 王俊芳¹, 窦宇宇¹, 王新宇¹, 杨熠², 刘荣顺²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 量化分析了风电经直流送出系统的振荡模式及各振荡模式与系统状态变量之间的关系, 揭示了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)系统内部振荡的环流零序分量与电容电压的交互影响机理; 基于该机理, 构建了 MMC 系统各桥臂等效电容储存总能量与零序电流的动态关系模型, 推导了 MMC 系统各桥臂等效电容储存总能量与电容电压差模量以及共模量的表达式, 提出了零序电流控制策略; 以该控制策略动态模型为对象, 计及该动态模型中间变量后, 对含零序电流控制策略 MMC 系统的振荡模式进行了分析, 结果表明, 所提控制策略可以使振荡模式的实部向左移动, 增加总阻尼, 提升系统稳定性。

关键词: 振荡机理; 电容存储能量; 参与因子; 零序电流控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.01.024 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2024)01-0234-09

Research on zero sequence current control strategy for suppressing internal oscillation of DC MMC send by wind power

LAN Yue¹, WANG Junfang¹, DOU Yuyu¹, WANG Xinyu¹, YANG Yi², LIU Rongshun²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Inner Mongolia Eastern Electric Power Co., Ltd., Hohhot 010020, China;

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper, the oscillation mode of wind power through DC transmission system is analyzed, and the interaction mechanism between the circulating current zero sequence component of MMC system internal oscillation and capacitor voltage is revealed. The mechanism of the internal oscillation of MMC system caused by the interaction between the zero sequence component of the circulating current and the capacitor voltage of MMC is revealed. The dynamic relationship between the total energy stored by the equivalent capacitance of each arm of the MMC system and the zero-sequence current is constructed. The differential modulus and the common modulus of the total energy stored by the equivalent capacitance of each arm of the MMC system are derived. The zero-sequence current control strategy is proposed. The dynamic model of the control strategy is constructed, and the oscillation mode of MMC system with zero sequence current control strategy is analyzed after considering the intermediate variables of the model. The results show that the proposed control strategy can make the real part of the oscillation mode move left and increase the total damping. The electromagnetic transient simulation model of wind power through DC transmission system with zero sequence current control strategy is constructed. The simulation results show that the proposed strategy greatly increases the damping level of the system, improving the stability.

Key words: oscillation mechanism; capacitance storage energy; participation factor; zero-sequence current control

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2023-06-07

基金项目: 国网内蒙古东部电力有限公司科技项目(526604220007)

通信作者: 杨熠(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事柔性交直流输电技术研究; E-mail: 1578954014@qq.com

风电场经基于模块化多电平换流器的柔性直流(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)送出系统具有十分广阔的应用前景,但随着相关实际工程的不断投运,该系统发生宽频振荡的问题也逐渐凸显。宽频振荡不仅会影响电源侧发电设备的正常运行,缩短电气设备的使用寿命,严重时会导致新能源发电机组跳闸脱网,还可能引起网侧旋转设备发生扭转振动,进而造成大面积停电事故,后果十分严重^[1-6]。因此,学者对风电场经MMC-HVDC送出系统的宽频振荡抑制策略开展了广泛研究,文献[7]通过优化柔直系统控制器参数,有效增强了系统的阻尼特性,避免了振荡现象的发生,但未分析风电机组变流器控制参数的影响作用;文献[8]提出了一种对风电场以及柔直系统控制器参数的协调优化设计方法,增强了互联系统稳定性,具有良好的振荡抑制效果;文献[9]通过提取输电线路次同步振荡电流分量,采用静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)装置向输电线路注入等比例电压,最终消除了系统发生振荡的风险;文献[10]针对风电场并网系统的振荡问题,提出了在风电场出口安装统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)的抑制策略,可有效缓解系统振荡;文献[11]为风电场的网侧变流器设计了一种非线性阻尼控制器以抑制系统振荡;文献[12]提出了一种源—网协同阻尼控制器,分析对比了电源侧、柔直侧单独以及两侧都使用阻尼控制器时的振荡抑制情况,抑制效果更显著;由于宽频振荡具有多模态特征且表现出显著的时变特性,为使振荡抑制策略具有良好的鲁棒性,文献[13-14]将双馈风电系统中背靠背变流器两端的交流侧电流作为输入量,提出了一种基于线性二次型调节器(linear qua-

dratic regulator, LQR)的自适应阻尼控制器,且具有良好的动态响应特性;文献[15]针对宽频振荡的时变性,设计了振荡电流提取滤波器以及次同步谐振动态抑制器,保证了系统在各种运行工况下都能对振荡分量起到抑制作用。

综上所述,风电场经MMC-HVDC送出系统的控制器参数是影响系统阻尼比的主要因素,通过优化控制器参数可有效提升系统在振荡频率附近的阻尼水平,起到抑制系统宽频振荡的作用,但该方法的鲁棒性较差;安装SSSC、UPFC等柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)装置可向风电并网系统注入反向电流/电压,消除风电场输出的振荡分量,实现宽频振荡抑制,该方法抑制效果显著,但成本较高,经济性较差;附加阻尼控制器既可以单独提升风电机组或网侧系统的阻尼水平,也可以设计源—网协同阻尼控制器,实现互联系统整体阻尼提升;新型振荡抑制策略可有效降低系统发生宽频振荡的风险,且具有良好的鲁棒性,但该方法相关理论较复杂,实现较困难,尚处于起步阶段,还需进一步研究。这些方法均属于借助外力,增加了系统的复杂度和投资成本。

本文基于特定系统,分析系统的振荡模式,研究导致内部振荡的机理,研究相应的控制策略,基于特征值法分析所提策略的有效性,采用时域仿真对所提策略进行进一步验证,为保障系统稳定运行提供技术支撑。

1 风电经直流送出系统振荡特性研究

本文采用文献[16]中的风电场经模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)直流外送等效模型进行分析,为方便说明问题,简化处理后的系统结构重画如图1所示。

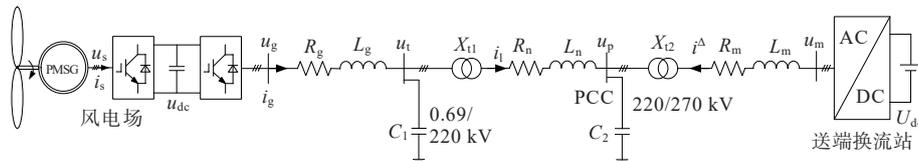


图1 简化后系统结构

Figure 1 Simplified system structure diagram

图1中,风电场简化为单台风机, u_s 、 i_s 分别为永磁同步发电机的端口电压和电流; u_g 、 i_g 分别为风电场的网侧变流器出口电压和电流; R_g 、 R_n 、 R_m 分别为简化处理后各段线路的电阻; L_g 、 L_n 、 L_m 分别为简化处理后各段线路的电感; X_{t1} 为等效升压变压器, X_{t2}

为匹配变压器,变压器漏感分别为 L_{t1} 和 L_{t2} ; C_1 为集电线路电容; C_2 为MMC-HVDC系统送端换流站滤波电容。

所采用的直流三相MMC换流器拓扑结构如图2所示,每个桥臂由 N 个子模块(sub-modular, SM)、

桥臂电阻 R_{arm} 以及桥臂电感 L_{arm} 串联组成。本文各桥臂中的子模块采用半桥型结构,如图2左上所示,每个子模块包括一个由2组绝缘栅双极晶体管(insulate-gate bipolar transistor, IGBT)和续流二极管构成的半桥电路以及直流电容 C ,通过控制IGBT的导通和关断状态来实现子模块输出电压在 u_c 和0之间切换。图2中 u_{pj} ($j = a, b, c$) 为交流侧电压; R_f, L_f 分别为交流侧线路电阻和电感; U_{dc} 为MMC换流器直流侧电压。

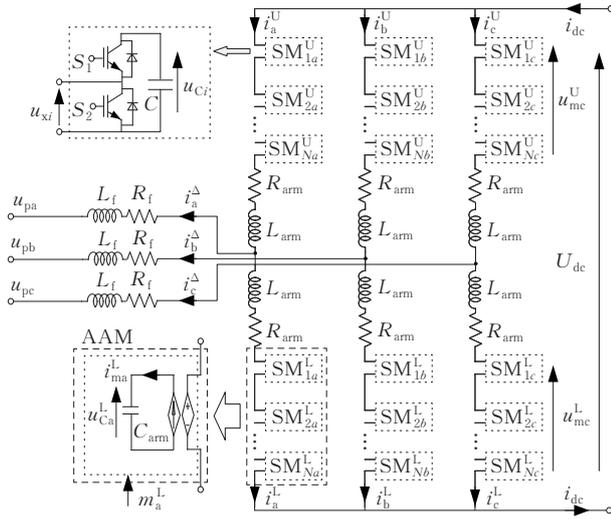


图2 MMC电路拓扑结构

Figure 2 MMC circuit topology structure

为简化分析,本文将每个桥臂上的 N 个子模块串联部分由受控电流源以及受控电压源替代,受控电流源与等效电容 C_{arm} 相连,受控电压源与桥臂电阻 R_{arm} 以及桥臂电感 L_{arm} 相连,如图2左下角的A相下桥臂所示。

联立风电机组动态模型以及MMC系统动态模型,并结合风电场与MMC系统接口模型,可得到完整的风电场经MMC-HVDC送出系统动态模型^[17-24]。通过对整体动态模型在稳态平衡点进行线性化后,可得到风电场经MMC-HVDC送出系统小信号模型,其形式为

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x + B\Delta u \quad (1)$$

式中,矩阵 A 为系统小信号模型的状态矩阵;矩阵 B 为系统的输入矩阵; Δx 为线性化后风电场经MMC-HVDC送出系统的状态变量,且 $x = [x_w, x_m]^T$, x_w 为单机等值后风电机组的状态变量, x_m 为MMC系统的状态变量; Δu 为线性化后风电场经MMC-HVDC送出系统的输入变量,且 $u = [u_w, u_m]^T$, u_w 为单机等值后风电机组的输入变量,

u_m 为MMC系统的输入变量。

风电机组的状态变量为

$$x_w = [\omega_s, i_{sd}, i_{sq}, u_{dc}, i_{gd}, i_{gq}, u_{ld}, u_{lq}, i_{ld}, i_{lq}, x_{pll}, \theta_g, x_{w1}, x_{w2}, x_{w3}, x_{w4}, x_{w5}, x_{w6}]^T$$

输入变量为

$$u_w = [\omega_{sref}, i_{sdref}, u_{dcref}, i_{gqref}]^T$$

MMC系统的状态变量为

$$x_m = [u_{pd}, u_{pq}, i_d^\Delta, i_q^\Delta, i_d^\Sigma, i_q^\Sigma, i_0^\Sigma, u_{Cd}^\Delta, u_{Cq}^\Delta, u_{C0}^\Delta, u_{C0}^\Sigma, u_{Cd}^\Sigma, u_{Cq}^\Sigma, u_{C0}^\Sigma, x_{m1}, x_{m2}, x_{m3}, x_{m4}, x_{m5}, x_{m6}]^T$$

输入变量为

$$u_m = [u_{pdref}, u_{pqref}, i_{dref}^\Sigma, i_{qref}^\Sigma]^T$$

文献[17]的研究表明,随着直驱风机并网台数的增加,系统的阻尼水平呈下降趋势,系统振荡风险增加。由此,本文将直驱风机并网台数由100台增加到200台,其中直驱风机的具体参数如表1所示,MMC系统参数如表2所示。其中,机侧控制系统

表1 永磁直驱风力发电系统参数

Table 1 Parameters of permanent magnet direct drive wind power generation system

模块	参数	单位	数值
风力机	风力机半径 R	m	63
	空气密度 ρ	kg/m ³	1.225
	自阻尼系数 B_m		0.002
永磁同步发电机	极对数 N_p		48
	定子等效电阻 R_s	Ω	0.006
	定子等效电感 ($L_d = L_q$)	mH	3.95
直流侧	转子永磁体磁链 ϕ_f	Wb	1.48
	公共直流侧电容 C_{dc}	mF	50
机侧控制	转速参考值 ω_{sref}	p.u.	1
	定子电流 d 轴分量参考值 i_{sdref}	p.u.	0
	转速外环PI控制器系数 (k_{wp1}, k_{wi1})		0.25, 5
	q 轴电流内环PI控制器系数 (k_{wp2}, k_{wi2})		1.50
系统	d 轴电流内环PI控制器系数 (k_{wp3}, k_{wi3})		1.50
	直流侧电容电压参考值 u_{dcref}	kV	1
	网侧变流器输出电流 q 轴分量参考值 i_{gqref}	p.u.	0
网侧控制	电容电压外环PI控制器系数 (k_{wp4}, k_{wi4})		4, 50
	d 轴电流内环PI控制器系数 (k_{wp5}, k_{wi5})		3, 100
	q 轴电流内环PI控制器系数 (k_{wp6}, k_{wi6})		3, 100
锁相环	锁相环控制器系数 (k_{p_pll}, k_{i_pll})		50, 100
	滤波电阻 R_g	Ω	0.000 5
交流侧线路	滤波电感 L_g	mH	0.2
	集电线路电阻 R_l	Ω /km	0.05
	集电线路电感 L_l	mH/km	0.38
	集电线路电容 C_l	μ F/km	0.187
	变压器 X_{t1} 变比	kV	0.69/220
	变压器 X_{t1} 漏感 L_{l1}	p.u.	0.1

表 2 MMC 系统参数

Table 2 MMC system parameters

模块	参数	单位	数值
交流侧 线路	滤波电容 C_2	μF	5
	交流侧线路电阻 R_f	Ω	0.5
	交流侧线路电感 L_f	mH	46.12
	变压器 X_{12} 变比	kV	220/270
	变压器 X_{12} 漏感 L_{12}	p.u.	0.1
送端 换流站	子模块个数		400
	桥臂电阻 R_{arm}	Ω	1
	桥臂电感 L_{arm}	mH	50
电压 控制 系统	桥臂等效电容 C_{arm}	μF	36.84
	PCC 点电压 d 轴分量参考值 u_{pdref}	p.u.	1
	PCC 点电压 q 轴分量参考值 u_{pqref}	p.u.	0
	d 轴电压外环 PI 控制器系数 (k_{mp1}, k_{mi1})		1, 10
	q 轴电压外环 PI 控制器系数 (k_{mp3}, k_{mi3})		1, 10
	d 轴电流内环 PI 控制器系数 (k_{mp2}, k_{mi2})		10, 200
环流 抑制 控制 器	q 轴电流内环 PI 控制器系数 (k_{mp4}, k_{mi4})		10, 200
	内部环流 d 轴分量参考值 i_{dref}^z	p.u.	0
	内部环流 q 轴分量参考值 i_{qref}^z	p.u.	0
	d 轴环流 PI 控制器系数 (k_{mp5}, k_{mi5})		40, 400
	q 轴环流 PI 控制器系数 (k_{mp6}, k_{mi6})		40, 400

转速基准值为 1 500 r/min, 变压器 X_{11} 漏感 L_{11} 基准值为 0.01 mH, 变压器 X_{12} 漏感 L_{12} 基准值为 1 H, 定子电流 d 轴分量、网侧变流器输出电流 q 轴分量、内部环流 d 轴分量与内部环流 q 轴分量基准值为 5 kA, PCC 点电压 d 轴与 q 轴分量基准值为 1 kV。

对图 1 所示系统进行计算, 得到系统主要振荡模式如表 3 所示。

表 3 风电场经 MMC-HVDC 送出系统的主要振荡模式

Table 3 Main oscillation modes of wind farm delivery system via MMC-HVDC

振荡 模式	并网台数 $n=100$		并网台数 $n=200$	
	特征值	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	$-36.32 \pm j8 613.73$	$-44.25 \pm j7 752.84$	1 233.90	0.005 71
$\lambda_{3,4}$	$-41.04 \pm j8 120.56$	$-50.64 \pm j7 290.74$	1 160.36	0.006 95
$\lambda_{5,6}$	$-50.53 \pm j3 961.32$	$-42.84 \pm j4 396.20$	699.68	0.009 74
$\lambda_{7,8}$	$-51.31 \pm j3 517.22$	$-41.60 \pm j3 920.24$	623.93	0.010 61
$\lambda_{9,10}$	$-14.47 \pm j668.28$	$10.23 \pm j648.47$	103.21	-0.015 78
$\lambda_{11,12}$	$-97.42 \pm j794.77$	$-98.29 \pm j786.40$	125.16	0.124 03
$\lambda_{13,14}$	$-58.05 \pm j970.91$	$-57.66 \pm j971.23$	154.58	0.059 25
$\lambda_{15,16}$	$-666.78 \pm j157.34$	$-666.65 \pm j154.86$	24.65	0.974 06
$\lambda_{17,18}$	$-356.01 \pm j118.35$	$-303.76 \pm j163.67$	26.05	0.880 34
$\lambda_{19,20}$	$-1.31 \pm j52.31$	$-0.20 \pm j51.84$	8.25	0.003 77
$\lambda_{21,22}$	$-51.19 \pm j327.59$	$-66.745 \pm j342.42$	54.50	0.191 33

由表 3 可知, 风电场经 MMC-HVDC 送出系统主要有 11 个振荡模式, 分别为 4 个次/超同步振荡模式 $\lambda_{15,16}, \lambda_{17,18}, \lambda_{19,20}$ 和 $\lambda_{21,22}$, 5 个中频振荡模式 $\lambda_{5,6}, \lambda_{7,8}, \lambda_{9,10}, \lambda_{11,12}$ 和 $\lambda_{13,14}$, 2 个高频振荡模式 $\lambda_{1,2}$ 和 $\lambda_{3,4}$ 。另外, 由表 3 可知, 随着直驱风机并网台数增加, 系统中振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的阻尼比由原来的正值变成了负值, 表明该振荡模式呈负阻尼状态, 这将有可能会导致风电场经 MMC-HVDC 送出系统发生振荡运行现象, 对系统的稳定性影响最大, 由此, 需要找出影响振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的关键参量, 并对其进行分析。

为了找出上述关键参量, 本文通过特征值分析法求取振荡模式的参与因子, 下面对该量化评价指标的计算公式进行详细推导。

对于状态矩阵 A 的任一特征值 λ_i , 若非零向量 $U_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, 其满足如下关系:

$$AU_i = \lambda_i U_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

则称向量 U_i 为特征值 λ_i 对应的右特征向量。同理, 若非零向量 $V_i \in \mathbf{R}^{n \times 1}$, 其满足如下关系:

$$V_i^T A = \lambda_i V_i^T, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

则称向量 V_i 为特征值 λ_i 对应的左特征向量。为定量分析各状态变量在不同振荡模式中的影响程度, 定义参与矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, 参与因子 p_{ki} 能够定量反映振荡模式与系统状态变量之间的相关程度, 具体含义为系统的状态变量 x_k 在振荡模式 λ_i 中的影响程度大小, 其计算表达式如下:

$$p_{ki} = \frac{V_{ki} U_{ki}}{V_i^T U_i} \quad (5)$$

式中, V_{ki}, U_{ki} 分别为左、右特征向量矩阵 V, U 中的第 k 行第 i 列的元素。所得参与因子 p_{ki} 的值越大, 说明振荡模式 λ_i 与状态变量 x_k 的相关程度越高, x_k 的影响程度越大。

对图 1 所示系统进行计算, 得到振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的参与因子, 进行归一化处理, 所得结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 振荡模式 $\lambda_{1,2}, \lambda_{3,4}, \lambda_{5,6}$ 以及 $\lambda_{7,8}$ 的参与变量一样, 都是由状态变量 $u_{1d}, u_{1q}, i_{1d}, i_{1q}, u_{pd}, u_{pq}, i_{d}^{\Delta}$ 和 i_{q}^{Δ} 主导参与, 与连接风电场和 MMC 系统之间的交流电缆状态变量有关, 但各个振荡模式的主导参与因子并不相同, 其中振荡模式 $\lambda_{1,2}, \lambda_{3,4}$ 主要受

MMC系统状态变量 u_{pd} 、 u_{pq} 的影响, 振荡模式 $\lambda_{5,6}$ 、 $\lambda_{7,8}$ 主要受风电场状态变量 u_{id} 、 u_{iq} 的影响。

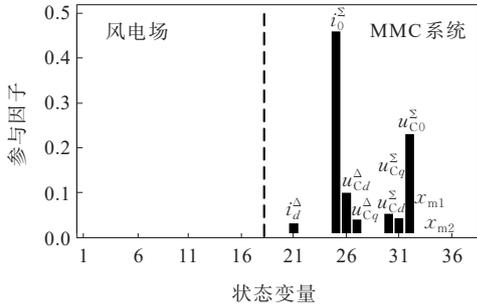


图3 风电场经MMC-HVDC送出系统振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 参与因子

Figure 3 Oscillatory mode $\lambda_{9,10}$ participation factor of MMC-HVDC transmission system for wind farms

由于与振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 相关的状态变量主要是MMC系统侧 i_0^z 和 u_{C0}^z , 参与因子分别为0.462 7和0.231 2, 由此可知该振荡模式是由MMC系统内部产生的, 和风电场无太大关联, 因此, 对该振荡模式的控制, 需从MMC系统内部参量着手, 以提高系统稳定性。

2 MMC内部振荡抑制策略

根据振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的参与因子可知, 内部环流零序分量 i_0^z 的参与程度最高, 而零序电流 i_0^z 在传统环流抑制控制器中处于不控状态, 随MMC系统交流侧向直流侧传输功率的变化而变化, 导致其易与MMC系统内部电容电压产生交互影响, 引发MMC系统内部振荡问题。为此, 需对零序电流 i_0^z 采取相应控制策略, 以提高MMC系统内部稳定性。

依据MMC系统交流侧与直流侧的功率守恒^[25-26], 结合图2所示的电流参考方向, 可得MMC系统各桥臂等效电容 C_{arm} 储存总能量 W_c 的动态方程为

$$\frac{dW_c}{dt} = P_{dc} - P_{ac} \approx U_{dc} i_{dc} - P_{acref} \quad (6)$$

式中, P_{acref} 为送端换流站交流侧的有功功率额定值。此外, 由于 $i_{dc} = 3i_0^z$, 可知式(6)建立了零序电流 i_0^z 与等效电容中总能量 W_c 之间的动态关系。

根据等效电容电压的差模量 u_{Cdq0}^Δ 以及共模量 u_{Cdq0}^Σ , 可推导出总能量 W_c 的近似表达式为

$$W_c \approx \frac{1}{2} C_{arm} \left[(u_{Cd}^\Sigma)^2 + (u_{Cq}^\Sigma)^2 + 2(u_{C0}^\Sigma)^2 \right] + \frac{1}{2} C_{arm} \left[(u_{Cd}^\Delta)^2 + (u_{Cq}^\Delta)^2 + (u_{C0}^\Delta)^2 + (u_{C0}^\Delta)^2 \right] \quad (7)$$

由式(7)可知, 通过控制零序电流 i_0^z 可间接影响桥臂等效电容电压的各个分量, 以此达到抑制MMC系统内部振荡的效果。

另外, 由图2可写出零序电流 i_0^z 的动态方程为

$$L_{arm} \frac{di_0^z}{dt} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{m0}^\Sigma - R_{arm} i_0^z \quad (8)$$

根据式(8)可为零序电流 i_0^z 设计PI控制器作为电流内环, 而电流内环的参考值 i_{0ref}^z 由能量外环得出。

结合式(6)~(8), 可设计如图4所示的零序电流控制器。

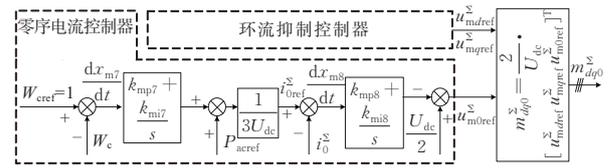


图4 零序电流控制器结构框

Figure 4 Structure diagram of zero sequence current controller

为研究采取零序电流控制策略后MMC系统的稳定性情况, 首先对该系统进行特征值分析, 以观察系统的振荡模式变化情况。

对图4所示的零序电流控制器结构框, 可写出其动态模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dx_{m7}}{dt} = W_{cref} - W_c \\ i_{0ref}^z = \left[P_{acref} + k_{mp7}(W_{cref} - W_c) + k_{mi7}x_{m7} \right] / 3U_{dc} \\ \frac{dx_{m8}}{dt} = i_{0ref}^z - i_0^z \\ u_{m0ref}^z = U_{dc}/2 - k_{mp8}(i_{0ref}^z - i_0^z) - k_{mi8}x_{m8} \end{cases} \quad (9)$$

式中, x_{m7} 、 x_{m8} 为中间变量, 同时也为零序电流控制器的状态变量; k_{mp7} 、 k_{mi7} 分别为能量外环PI控制器的比例和积分系数; k_{mp8} 、 k_{mi8} 分别为零序电流内环PI控制器的比例和积分系数。

由式(9)可知, 对零序电流 i_0^z 采取控制策略后, MMC系统的状态变量会增加2个, 即中间变量 x_{m7} 、 x_{m8} , 且输入变量也会增加1个, 即总能量参考值 W_{cref} 。为此, 在对采取零序电流控制策略后的简化系统模型进行特征值分析时, MMC系统的小信号模型需增加式(5)中的状态变量以及输入变量。

3 案例验证分析

3.1 特征值结果及分析

结合式(9)所示的动态模型,可得采取零序电流控制策略后 MMC 系统的振荡模式如图 5 所示。

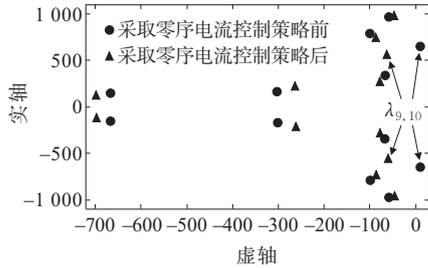


图 5 采取零序电流控制策略前后系统振荡模式对比

Figure 5 Comparison of system oscillation modes before and after adopting zero sequence current control strategy

由图 5 可知,在采取零序电流控制策略前,系统中只存在 1 个呈负阻尼状态的振荡模式 $\lambda_{9,10}$,其余振荡模式都为正阻尼状态。对 MMC 系统的零序电流采取所提控制策略后,原本为负阻尼状态的振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 转变成正阻尼状态,且 MMC 系统中其他振荡模式保持为正阻尼状态,表明了 MMC 系统在小扰动情况下能够保持安全稳定运行。另外还可发现,在采取零序电流控制策略后,MMC 系统中的大多数振荡模式在复平面内向左移动,系统总阻尼呈上升趋势,表明了 MMC 系统的稳定裕度在增加。

为进一步分析采取零序电流控制策略前后振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的动态特性变化,以桥臂电阻 R_{arm} 为例,计算该参数的特征值灵敏度变化情况,结果如表 4 所示。

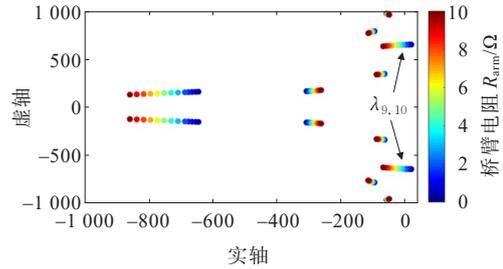
表 4 采取零序电流控制策略前后的特征值灵敏度变化情况

Table 4 Variation of eigenvalue sensitivity before and after adopting zero sequence current control strategy

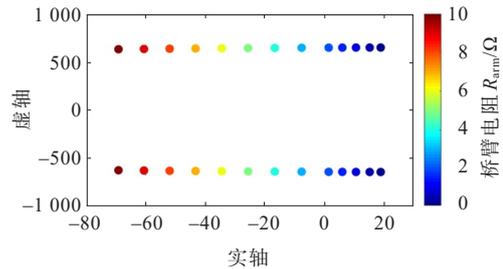
参数	采取前	采取后
	特征值灵敏度	特征值灵敏度
桥臂电阻 R_{arm}	$-8.871\ 61-j1.832\ 27$	$-6.106\ 62-j4.933\ 10$

由表 4 可知,在采取零序电流控制策略后,桥臂电阻 R_{arm} 的特征值灵敏度实部以及虚部都为负值,与未采取零序电流控制策略时的特征值灵敏度一样,且数值变化不大,表明了当桥臂电阻 R_{arm} 增大时,振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的阻尼比水平也将上升,频率也呈下降趋势。

为验证采取零序电流控制策略前后特征值灵敏度的正确性,在保证系统其他参数不变的情况下,改变桥臂电阻 R_{arm} 的大小,对比分析系统各振荡模式的阻尼比和频率变化情况,结果如图 6、7 所示。



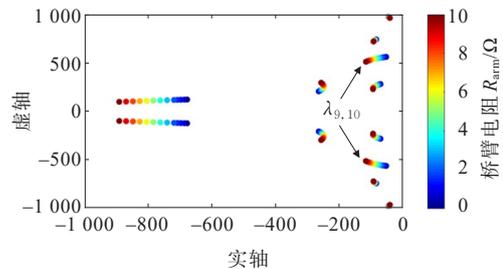
(a) 系统所有振荡模式的变化情况



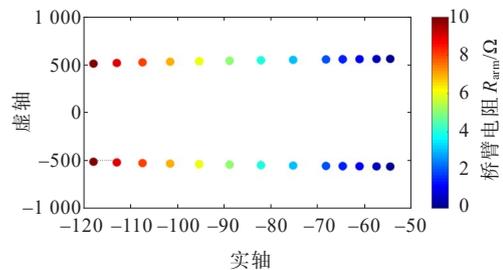
(b) 振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的变化情况

图 6 未采取零序电流控制策略时系统各振荡模式变化情况

Figure 6 Changes of system oscillation modes without zero sequence current control strategy



(a) 系统所有振荡模式的变化情况



(b) 振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的变化情况

图 7 采取零序电流控制策略后系统各振荡模式变化情况

Figure 7 Changes of system oscillation modes after adopting zero sequence current control strategy

通过对比分析图6、7后可知,采取零序电流控制策略后,振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的阻尼比变化最大,由原来的负阻尼状态变成正阻尼状态,MMC系统的小干扰稳定性得到了大幅度提升。由图7(a)可知,采取零序电流控制策略后,当桥臂电阻 R_{arm} 增加时,MMC系统中大多数振荡模式的实部都向左移动,系统总阻尼增加;由图7(b)可知,桥臂电阻 R_{arm} 增加时,振荡模式 $\lambda_{9,10}$ 的阻尼比呈上升趋势,频率略有下降,与特征值灵敏度分析结论保持一致。

3.2 时域仿真结果及分析

为验证本文所提零序电流控制器的有效性,基于PSCAD/EMTDC仿真平台构建图1所示的电磁暂态模型,并构建如图4所示的零序电流控制系统。另外,为对比分析所提策略的有效性,还建立了文献[12]中的有源阻尼控制器。

具体时域仿真实验方案如下:MMC系统初始时不投入零序电流控制器,在5.0 s时给MMC系统加入扰动,在5.5 s时将零序电流控制器投入。选取零序电流作为观测量,得到的时域仿真结果如图8所示。

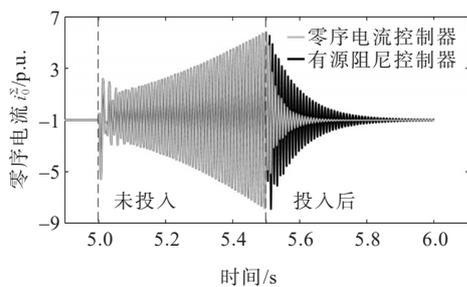


图8 零序电流 i_0^z 时域仿真波形

Figure 8 Zero sequence current i_0^z time domain simulation waveform

由图8可知,在未投入零序电流控制器的情况下,5.0 s后零序电流 i_0^z 开始振荡发散,系统处于增幅振荡状态。将零序电流控制器投入后,零序电流 i_0^z 逐渐收敛,并在约0.2 s后系统趋于稳定。为进行对比分析,本文将文献[12]所提的有源阻尼控制器的效果示于图8中的深色部分,同样情况下,采用该策略约0.4 s后系统才趋于稳定。由此可见,本文所提的控制策略可以大幅提升系统阻尼水平。

4 结语

本文基于简化的风电场经MMC直流送出系统的等效电路,详细分析了其振荡模式;基于参与因子的分析方法,揭示了MMC内部环流零序分量引发MMC系统内部振荡的机理;推导了电容能量与零序电流的数学关系,提出了以电容能量为外环、零序电流分量为内环的MMC内部振荡抑制控制策略;通过特征值分析及时域仿真,得到如下结论:

1) 采取零序电流控制策略后,MMC系统侧的零序电流和直流电压密切相关,阻尼比 $\lambda_{9,10}$ 由原来的负阻尼状态变成正阻尼状态,MMC系统的小干扰稳定性得到了大幅度提升;

2) 采取零序电流控制策略后,当桥臂电阻 R_{arm} 增加时,MMC系统中大多数振荡模式的实部都向左移动,系统总阻尼增加;

3) 采用零序电流控制策略后,与其他控制策略相比,其趋稳时间可以由0.4 s减少到0.2 s,缩短了近50%,效果显著。

参考文献:

- [1] 邢琛,张新燕,周鹏,等.链式STATCOM在双馈风电场中的谐波抑制研究[J].电测与仪表,2022,59(4):66-71.
XING Chen, ZHANG Xinyan, ZHOU Peng, et al. Research on harmonic suppression of chained STATCOM applied in doubly-fed wind farm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 66-71.
- [2] 戴礼国,杨浩,陈力,等.基于深度强化学习的风电柔直并网系统次同步振荡抑制方法[J].智慧电力,2023,51(4):1-7+91.
DAI Ligu, YANG Hao, CHEN Li, et al. Subsynchronous oscillation suppression method for flexible direct grid-connected wind power system based on deep reinforcement learning[J]. Smart Power, 2023, 51(4): 1-7+91.
- [3] 薛峰,吴家龙,崔晓丹,等.基于阻抗辨识的沽源地区风电并网系统次同步振荡控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(5):200-207.
XUE Feng, WU Jialong, CUI Xiaodan, et al. Subsynchronous oscillation control strategy based on impedance identification for wind power grid-connected system in Guyuan area of China[J]. Automation of

- Electric Power Systems,2023,47(5):200-207.
- [4] 随顺科,任铁强,邹强,等.连接风电系统的柔性直流电网MMC在线投入分析与验证[J].供用电,2022,39(11):26-31.
SUI Shunke,REN Tieqiang,ZOU Qiang,et al. Analysis and verification of MMC online entry into a flexible DC grid connected to wind power system[J]. Distribution & Utilization,2022,39(11):26-31.
- [5] 程静,苏乐,岳雷.双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2023,51(12):1-13.
CHENG Jing,SU Le,YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control,2023,51(12):1-13.
- [6] 董文凯,任必兴,王海风,等.适用于系统次同步振荡分析的风电场等值建模方法综述[J].电力工程技术,2022,41(4):33-43.
DONG Wenkai,REN Bixing,WANG Haifeng,et al. Small-signal equivalent modeling methods of the wind farm and its application in sub-synchronous oscillations analysis of grid-connected wind power systems[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(4):33-43.
- [7] 宋斯珩,赵书强.基于转矩法的双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡分析[J].电网技术,2020,44(2):630-636.
SONG Siheng,ZHAO Shuqiang. Analysis of sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farm integrated to grid through VSC-HVDC system based on torque method[J]. Power System Technology,2020,44(2):630-636.
- [8] 吕敬,蔡旭.提高风场柔直并网系统稳定性的控制器参数优化设计[J].中国电机工程学报,2018,38(2):431-443+674.
LÜ Jing,CAI Xu. Controller parameters optimization design for enhancing the stability of wind farm with VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(2):431-443+674.
- [9] 高本锋,王飞跃,于弘洋,等.应用静止同步串联补偿器抑制风电次同步振荡的方法[J].电工技术学报,2020,35(6):1346-1356.
GAO Benfeng,WANG Feiyue,YU Hongyang,et al. The suppression method of wind power sub-synchronous oscillation using static synchronous series compensator [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(6):1346-1356.
- [10] GOLSHANNAVAZ S,AMINIFAR F,NAZARPOUR D. Application of UPFC to enhancing oscillatory response of series-compensated wind farm integrations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(4):1961-1968.
- [11] CHOWDHURY M A,MAHMUD M A,SHEN W X,et al. Nonlinear controller design for series-compensated DFIG-based wind farms to mitigate subsynchronous control interaction[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2017,32(2):707-719.
- [12] 边晓燕,丁炆,买坤,等.海上风电场经VSC-HVDC并网的次同步振荡与抑制[J].电力系统自动化,2018,42(17):25-33.
BIAN Xiaoyan,DING Yang,MAI Kun,et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(17):25-33.
- [13] GHAFOURI M,KARAAGAC U,KARIMI H,et al. An LQR controller for damping of subsynchronous interaction in DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(6):4934-4942.
- [14] GHAFOURI M,KARAAGAC U,MAHSEREDJIAN J,et al. SSCI damping controller design for series-compensated DFIG-based wind parks considering implementation challenges[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(4):2644-2653.
- [15] 廖坤玉,肖湘宁,罗超,等.基于VSC的双馈风电场群宽频带次同步谐振抑制作用分析与实验[J].电力自动化设备,2019,39(10):71-79.
LIAO Kunyu,XIAO Xiangning,LUO Chao,et al. Effect analysis and experiment of broadband sub-synchronous resonance suppression of DFIG-based wind farm groups based on VSC[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):71-79.
- [16] 安之,沈沉,郑泽天,等.考虑风电随机性的直驱风机风电场等值模型评价方法[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6511-6520.
AN Zhi,SHEN Chen,ZHENG Zetian,et al. Assessment method for equivalent models of wind farms based on direct-driven wind generators considering randomness[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(22):6511-6520.
- [17] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等.直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J].中国电机工程学报,2016,36(9):2366-2372.
XIE Xiaorong,LIU Huakun,HE Jingbo,et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(9):2366-2372.

- [18] 高明阳. 双馈风电机组参数辨识及风电场动态等值方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.
GAO Mingyang. Research on parameter identification of doubly fed wind turbine and dynamic equivalent method of wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University,2021.
- [19] BERGNA-DIAZ G, FREYTES J, GUILLAUD X, et al. Generalized voltage-based state-space modeling of modular multilevel converters with constant equilibrium in steady state[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2018,6(2):707-725.
- [20] 王宝华,单馨. 抑制双馈风电场次同步振荡的粒子群优化附加阻尼控制器设计[J]. 南京理工大学学报,2019,43(5):632-639,646.
WANG Baohua, SHAN Xin. Design of additional damping controller based on improved particle swarm optimization algorithm for depressing sub-synchronous oscillation of DFIG-based wind farm[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2019,43(5):632-639,646.
- [21] 蔡维正,郭昆丽,刘璐雨,等. 基于一阶LADRC控制的直驱风机次同步振荡抑制策略[J]. 中国电力,2022,55(4):175-184.
CAI Weizheng, GUO Kunli, LIU Luyu, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on first-order LADRC for direct-drive wind turbines[J]. Electric Power,2022,55(4):175-184.
- [22] 康佳乐,余浩,段瑶,等. 风电场次同步振荡等值建模方法研究[J]. 发电技术,2022,43(6):880-891.
KANG Jiale, YU Hao, DUAN Yao, et al. Equivalent modeling method of sub-synchronous oscillation in wind farm[J]. Power Generation Technology,2022,43(6):880-891.
- [23] 张文君,王爽,陈小月,等. 海上风电场经海底电缆送出系统的并联电抗器配置方案[J]. 高压电器,2022,58(1):38-45.
ZHANG Wenjun, WANG Shuang, CHEN Xiaoyue, et al. Shunt reactor configuration of offshore wind farm transmission system with submarine cable[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(1):38-45.
- [24] 崔晓丹,吴家龙,王希,等. 适用于次同步振荡研究的直驱风电场等值建模[J]. 电网与清洁能源,2022,38(10):148-157.
CUI Xiaodan, WU Jialong, WANG Xi, et al. Equivalent modeling of direct drive wind farms for subsynchronous oscillation research[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(10):148-157.
- [25] 赵峥,李明,田园园,等. 江苏如东海上风电柔直工程系统谐振分析与抑制[J]. 电力建设,2023,44(6):144-152.
ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. Electric Power Construction,2023,44(6):144-152.
- [26] 王一凡. 直驱风电场经模块化多电平换流器送出系统的稳定性分析[D]. 北京:华北电力大学,2020.
WANG Yifan. Stability analysis for PMSG-based wind farm integrated through modular multilevel converter[D]. Beijing:North China Electric Power University,2020.