

引用格式:李长宇,刘博昊,肖仕武,等.基于功率外环附加阻尼控制的柔性直流抑制送端火电机组次同步振荡研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):20-27.

Citation: LI Changyu, LIU Bohao, XIAO Shiwu, et al. Research on subsynchronous oscillation suppression strategy of flexible HVDC with thermal power units based on external loop damping control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 20-27.

# 基于功率外环附加阻尼控制的柔性直流抑制 送端火电机组次同步振荡研究

李长宇<sup>1</sup>, 刘博昊<sup>2,3</sup>, 肖仕武<sup>3</sup>, 卢文清<sup>1</sup>, 梁倍华<sup>1</sup>, 李善颖<sup>1</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 国网天津市电力公司滨海供电分公司, 天津 300450;

3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 利用柔性直流控制的灵活性抑制次同步振荡被广泛研究, 但是对于有功、无功控制回路的抑制效果不同的机理解释很少。针对柔直近区火电机组的次同步振荡问题, 提出一种基于功率外环附加阻尼控制的柔直抑制次同步振荡策略。通过对电气阻尼曲线负阻尼频段分析, 结合柔直变流器控制特点, 选取附加控制的最优位置, 通过基于功率外环附加阻尼控制提高火电机组电气阻尼。然后, 建立复转矩系数传递函数, 分析有功、无功外环附加阻尼控制效果的强弱与柔直功率外环参数相关, 主要是与传输有功、无功功率大小有关, 揭示柔直功率外环 d 轴和 q 轴附加阻尼控制时对电气阻尼影响差异的机理。最后, 通过 PSCAD 时域模型仿真验证分析的正确性。

**关键词:** 柔性直流输电; 次同步振荡; 电气阻尼; 复转矩系数; 附加阻尼控制; 抑制效果分析

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.003 中图分类号: TM712 文章编号: 1673-9140(2024)02-0020-09

## Research on subsynchronous oscillation suppression strategy of flexible HVDC with thermal power units based on external loop damping control

LI Changyu<sup>1</sup>, LIU Bohao<sup>2,3</sup>, XIAO Shiwu<sup>3</sup>, LU Wenqing<sup>1</sup>, LIANG Beihua<sup>1</sup>, LI Shanying<sup>1</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China; 2. Binhai Power Supply Branch of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300450, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The flexibility of flexible DC control has been widely studied to suppress subsynchronous oscillation, but there is little explanation of the mechanism for the different suppressive effects of active and reactive control loops. Aiming at the subsynchronous oscillation problem of thermal power units in the vicinity of flexible DC, a suppression strategy for subsynchronous oscillation of flexible DC based on additional damping control of the power outer loop is proposed. By analyzing the negative damping frequency band of the electrical damping curve and combining the control characteristics of the flexible DC converter, the optimal position for additional control is selected, and the electrical damping of the thermal power unit is improved through additional damping control based on the power outer loop. Then, a transfer function of the complex torque coefficient is established, and it is analyzed that the damping effect of the active and reactive outer loop with additional damping control is related to the parameters of the power outer loop, mainly related to the transmitted active and reactive power, revealing the mechanism of the difference in the impact of additional damping control on the electrical damping of the d-axis and q-axis of the power outer loop. Finally, the correctness of the analysis is verified through simulation of PSCAD time-domain model.

**Key words:** flexible DC transmission; subsynchronous oscillation; electrical damping; complex torque coefficient; additional damping control; damping effect analysis

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2024-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(52130709)

通信作者: 肖仕武(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统稳定与控制、电力系统继电保护等方面的研究; E-mail: xsw@ncepu.edu.com

在能源分布与用电负荷发展极不均衡的背景下<sup>[1]</sup>,相对于其他输电方式,柔性直流输电凭借无换相失败风险、无需大容量无功补偿等优势,在新能源并网、海上平台供电、大规模新能源基地输电等方面应用广泛<sup>[2]</sup>。随着柔性直流输电工程的快速发展和应用,与柔直变流器有关的各种不同类型振荡现象正在逐步增加<sup>[3]</sup>,研究通过柔直抑制系统振荡具有重要意义。

电网中现有火电机组容量巨大<sup>[4]</sup>,火电机组仍是电能的主要提供者,广泛存在于电网中。柔直变流器的快速精确控制特性,使得柔直在运行过程中在变流器交流侧的阻抗特性为负电阻容性<sup>[5-6]</sup>。当火电机组与柔性直流输电距离较近时可能引起火电机组轴系次同步振荡<sup>[7]</sup>。在渝鄂背靠背柔直工程<sup>[6-8]</sup>、舟山柔直工程<sup>[9]</sup>中存在次同步振荡风险,当柔直送端近区有火电机组接入时,需要对系统进行次同步振荡风险评估,必要时需采用控制策略对系统次同步振荡进行抑制。

针对柔性直流输电系统导致次同步振荡问题,目前已有的研究主要包括4种抑制策略<sup>[6]</sup>:协调整定柔直变流器控制参数<sup>[7-10]</sup>、柔直变流器附加次同步阻尼控制<sup>[11-16]</sup>、采用附加滤波装置<sup>[17]</sup>以及安装抑制次同步振荡的专用变流控制装置<sup>[18-19]</sup>。在参数整定上,文献[7]通过电气负阻尼相关因子和灵敏度分析,对影响振荡的柔直控制器关键参数进行整定。文献[7,10]所提的调整控制参数的方法存在参数范围有限,正阻尼增加受限的缺点。在附加阻尼控制上,文献[11]提出在柔直变流器的电流控制环上附加一个增益环节,相当于在柔直桥臂上产生一个虚拟电阻;文献[12]在风机经柔直送出系统中,选择在风电机组转子侧换流器附加阻尼控制;文献[16]在柔直变流器的功率外环附加超前滞后环节,平抑功率振荡。这些文献所提方案均能提高次同步阻尼。在附加滤波装置上,根据工作原理不同,可分为串联阻塞滤波器和并联旁路滤波器。在专用变流器控制装置上,文献[18]提出在系统中配置专门柔性交流输电系统设备,但这种方法没有考虑柔直控制器本身的调节特性和振荡抑制能力,增加了系统造价。

本文针对柔性直流引发火电机组次同步振荡问题,提出了基于柔直变流器功率外环附加次同步阻尼控制的抑制策略,分析了有功、无功外环抑制效果的差异及机理。首先,基于电气阻尼分析法计算电气阻尼的相关因子和灵敏度,确定影响

电气系统负阻尼关键环节和参数,通过在柔直变流器的关键环节上附加次同步阻尼控制,改善负阻尼频段的电气负阻尼,从而抑制系统次同步振荡。然后,分析附加阻尼控制施加位置不同时的柔直端口阻抗特性,进而分析电气阻尼曲线的不同,确定了附加阻尼不同位置导致抑制效果不同的根本原因。

## 1 柔直抑制近区火电机组次同步振荡分析

实际某火电厂接入近区背靠背柔性直流输电系统,研究发现该火电厂存在次同步振荡风险<sup>[5,7]</sup>,且与系统中的柔性直流输电有关。故以此工程为例分析柔直对火电机组次同步振荡特性的影响和抑制策略研究。火电机组—柔直系统结构如图1所示,元件电气参数值如表1所示。

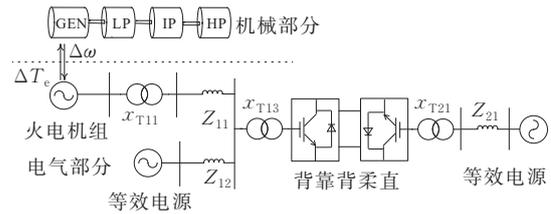


图1 火电机组—柔直系统结构

Figure 1 System composed of thermal power units and flexible HVDC

表1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

柔性直流参数	单位	数值
额定传输功率	MW	1 250
直流侧额定电压	kV	±420
桥臂子模块数	个	500
桥臂子模块电容值	μF	11 000
桥臂电感值	mH	50
整流站外环控制比例/积分参数	p.u.	4/20
整流站内环控制比例/积分参数	p.u.	0.65/100
换流变变比	kV	500/420
火电机组参数	单位	数值
额定功率	MW	667
定子侧额定电压	kV	20
升压变变比	kV	20/525
输电线路参数	单位	数值
Z <sub>11</sub> 电阻/电感	p.u.	0.008 71/0.125 78
Z <sub>12</sub> 电阻/电感	p.u.	0.000 62/0.005 03
Z <sub>21</sub> 电阻/电感	p.u.	0.016 15/0.238 27

## 1.1 系统建模

建立如图1所示的复转矩系数传递函数,火电机组、柔性直流和电力网络部分小信号方程为

$$\begin{cases} \frac{d\Delta X_G}{dt} = A_G \Delta X_G + B_G \begin{bmatrix} \Delta u_{sdq} \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \\ \frac{d\Delta X_{MMC}}{dt} = A_{MMC} \Delta X_{MMC} + B_{MMC} \Delta u_{sdq1} \\ \frac{d\Delta X_W}{dt} = A_W \Delta X_W + B_W \begin{bmatrix} \Delta i_{sdq} \\ \Delta i_{sdq1} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\Delta X_G$ 、 $\Delta X_W$ 、 $\Delta X_{MMC}$ 分别对应火电机组、电力网络和柔直的状态变量; $\Delta u_{sdq}$ 、 $\Delta i_{sdq}$ 为火电机组和电力网络接口  $dq$  轴电压电流变量; $\Delta u_{sdq1}$  和  $\Delta i_{sdq1}$  为电力网络和柔直接口  $dq$  轴电压电流变量; $\Delta T_e$  和  $\Delta \omega$  为火电机组电气部分和机械部分接口变量; $A_G$ 、 $B_G$ 、 $A_W$ 、 $B_W$ 、 $A_{MMC}$ 、 $B_{MMC}$  为系数矩阵。

联立式(1)中方程,可得系统电气部分小信号方程,转化至频域下,得到火电机组的复转矩系数传递函数:

$$G_e(s) = \frac{\Delta T_e}{\Delta \omega} = C(sI - A)^{-1}B \quad (2)$$

式中, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 分别为电气部分小信号方程的状态矩阵、输入和输出矩阵; $I$ 为与 $A$ 同阶的单位矩阵。 $G_e(s)$ 实部为电气阻尼系数。

根据复转矩系数或电气阻尼判稳原则,当电磁转矩  $\Delta T_e$  和转速转差  $\Delta \omega$  相位差小于  $90^\circ$  或复转矩系数实部(即电气阻尼系数)大于0时,此时系统没有次同步振荡风险;否则,存在次同步振荡风险。

根据式(2)理论推导电气阻尼曲线,与时域仿真扫频得到的电气阻尼曲线对比,如图2所示。可知,理论推导获得的电气阻尼曲线与仿真扫频结果吻合,验证了复转矩系数传递函数的正确性。在19~23 Hz频段内存在电气负阻尼,会导致在该频段

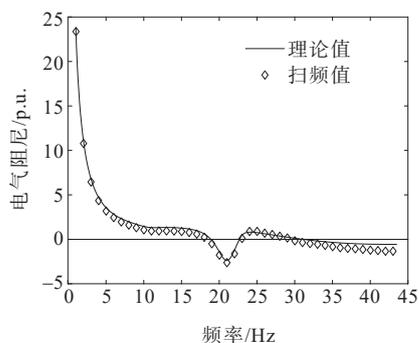


图2 系统电气阻尼曲线理论推导与扫频结果对比

Figure 2 Comparison between theoretical derivation of system electric damping curve and swept frequency

内的火电机组轴系次同步振荡模式存在风险<sup>[20]</sup>。为了消除次同步振荡风险,需要减小或消除电气负阻尼。基于电气阻尼的相关因子和参数灵敏度方法,可以确定导致电气负阻尼的关键环节和参数,最终得到柔直整流站功率外环与20 Hz附近电气负阻尼的相关性很大<sup>[7]</sup>。因此,下一步考虑在整流站柔直外环附加阻尼控制,抑制系统次同步振荡。

## 1.2 基于功率外环附加阻尼控制的基本结构

根据相关因子和灵敏度分析结果,在不影响系统工频特性下,在柔直整流站功率外环  $d$ 、 $q$  轴中附加阻尼控制器,其传递函数表达式为

$$G_{ssr}(s) = K_{ssr} \frac{s/\omega_c}{1 + 2\xi s/\omega_c + (s/\omega_c)^2} = K_{ssr} G_{BPF}(s) \quad (3)$$

式中, $K_{ssr}$ 为附加阻尼控制的比例增益; $G_{BPF}(s)$ 为二阶带通滤波器; $\omega_c$ 为滤波器的特征频率; $\xi$ 为滤波器的阻尼比。附加阻尼控制可以施加在外环  $d$  轴,也可以施加在  $q$  轴。

## 1.3 附加阻尼控制参数设计

根据文1.1分析结果可知,火电机组在20 Hz附近电气阻尼为负,存在次同步振荡的风险。且相关因子和参数灵敏度分析也主要在这一频段内,所以滤波器的特征频率  $\omega_c$  选为20 Hz,即电气阻尼为负的频段。由滤波器的滤波特性可知,阻尼比越小,则相移越小,但滤波效果差;阻尼比越大,则相移越大,滤波效果好。所以兼顾滤波和相移,选择阻尼比范围为0.4~0.6。

比例增益正负及大小的选择根据文1.1电气阻尼灵敏度分析计算结果进行选择确定<sup>[7]</sup>。通过计算未附加阻尼控制时的电气负阻尼极值,确定需要补偿的电气阻尼大小,通过调节灵敏度大的参数确定参数变化量,进而确定比例增益  $K_{ssr}$  的值。

增大功率外环比例参数  $K_{p1}$  可增大电气阻尼。当  $K_{p1}$  增大时,电气负阻尼频段电气阻尼由负变正,次同步振荡风险消失。通过附加次同步阻尼控制环节可以有效抑制火电机组次同步振荡。基于电气阻尼相关因子和灵敏度的计算,可以确定电气负阻尼的关键影响环节和因素,但是无法解释关键环节的作用机理。由图3中柔直整流站控制环节可以看出,整流站  $dq$  轴控制环节基本对称,附加阻尼控制可以施加在功率外环  $d$  轴,也可以施加在  $q$  轴。因此,需要对比分析2种施加位置效果的差异及其产生机理。

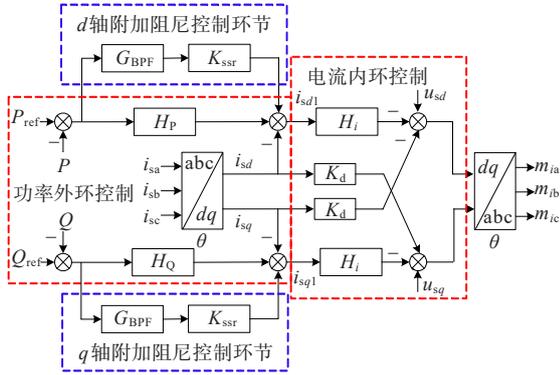


图 3 柔直整流站外环附加阻尼控制传递函数

Figure 3 Block diagram of HVDC rectifier station with additional damping control in power outer loop

## 2 功率外环附加控制位置选择及抑制效果分析

### 2.1 附加阻尼控制施加在功率外环 dq 轴的效果对比

柔直整流站的功率外环 dq 轴分别控制有功、无功,附加阻尼控制<sup>[12]</sup>可以施加在 d 轴或 q 轴,具体方案如图 3 所示。

分别在功率外环 d 轴或 q 轴上施加附加阻尼控制,理论推导得到火电机组电气阻尼曲线如图 4 所示。可知,柔直整流站 d 轴功率外环也比 q 轴功率外环的附加阻尼控制效果要好。

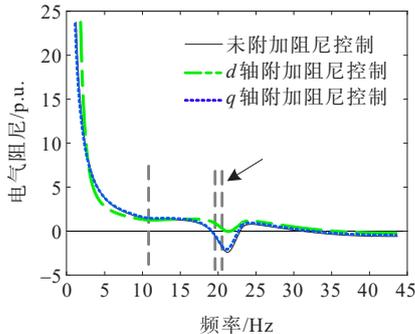


图 4 dq 轴分别附加阻尼控制时电气阻尼曲线

Figure 4 Electrical damping curves of dq axis with additional damping controls

由图 4 可知,功率外环 q 轴附加阻尼控制的效果和未施加阻尼控制下基本一样,而功率外环 d 轴附加阻尼控制的效果要远优于 q 轴附加阻尼控制,提高了 20 Hz 附近频段的电气阻尼水平,使电气阻尼为正,有效防止了火电机组次同步振荡风险。

柔直功率外环 d 轴和 q 轴控制参数一致,通过相关因子等分析无法解释 d 轴和 q 轴控制效果不同的原因。由此,下面将深入讨论 d 轴附加阻尼控制效果最优的根本原因。

### 2.2 柔直阻抗特性对电气阻尼的影响

由文 1.2 可知,附加阻尼控制实际上就是改变电气负阻尼频段的外环控制环节参数。因此,要分析不同控制环节附加阻尼控制效果不同的原因,需要推导火电机组经柔直送出系统的复转矩系数的小信号传递函数,分析不同环节对电气阻尼的影响关系。

火电机组与机械部分的接口变量为电磁转矩  $\Delta T_e$  和转速转差  $\Delta\omega$ ,与电网部分接口变量为机端电压  $\Delta u_{dq}$  和  $\Delta i_{dq}$ ,其传递函数<sup>[21-22]</sup>可表示为

$$\begin{cases} \Delta i_{dq} = H_{iu} \Delta u_{dq} + H_{io} \Delta\omega \\ \Delta T_e = H_{Tu} \Delta u_{dq} + H_{T\omega} \Delta\omega \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $H_{iu}$ 、 $H_{io}$ 、 $H_{Tu}$ 、 $H_{T\omega}$  分别为对应传递函数矩阵,与火电机组参数有关。

电网部分等效阻抗以电网 xy 旋转坐标系为基准,采用 xy 轴等效阻抗  $Z_{eq}$  进行建模,可以表示为

$$\Delta u_{xy} = Z_{eq} \Delta i_{xy} \quad (5)$$

式中,  $\Delta u_{xy}$ 、 $\Delta i_{xy}$  分别为电网部分与火电机组接口的电压和电流。

将式(5)转化到以火电机组 dq 轴为基准的旋转坐标系并联立式(4),可得电磁转矩增量  $\Delta T_e$  和转子角速度增量  $\Delta\omega$  之间的复转矩系数为

$$\Delta T_e(s) / \Delta\omega(s) = H_{Tu}(s) \left( Y_{mmc}(s) + Y_w(s) + (Z_M(s))^{-1} \right)^{-1} \cdot H_{oi}(s) + H_{T\omega}(s) \quad (6)$$

式中,  $Y_{mmc}(s)$ 、 $Y_w(s)$ 、 $Z_M(s)$  分别为柔直导纳、电力网络导纳和火电机组端口阻抗;  $H_{Tu}(s)$ 、 $H_{oi}(s)$  为与发电机阻抗和发电机出口电流初值有关的矩阵;  $G_{e1}(s)$  为与外部网络、柔直和火电机组三者交互作用有关的复转矩系数传递函数;  $H_{T\omega}(s)$  为转差  $\Delta\omega$  直接引起  $\Delta T_e$  变化的传递函数。

对应系统复转矩传递函数框图如图 5 所示。由式(6)及图 5 可知,火电机组电气负阻尼主要受到  $G_{e1}(s)$  影响,需针对  $G_{e1}(s)$  进行分析。  $H_{Tu}(s)$ 、 $H_{oi}(s)$  和  $Z_M(s)$  为火电机组参数相关的矩阵,在机组运行过程中基本不变。因此,  $G_{e1}(s)$  主要受到外部网络阻抗特性(柔直阻抗和网络阻抗)的影响。由此可以计算出当外部网络阻抗特性分别为正阻感性、正阻容性、负阻感性和负阻容性时,  $G_{e1}(s)$  传递函数在次同步振荡频率范围内相位角变化规律,如图 6 所示。

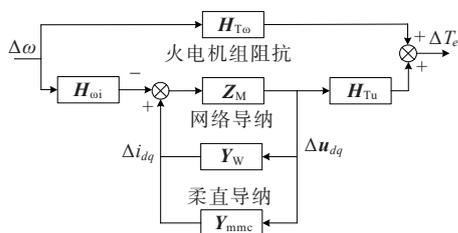


图5 火电—柔直系统复转矩系数传递函数

Figure 5 Complex torque coefficient transfer function of system composed of thermal power units and flexible HVDC

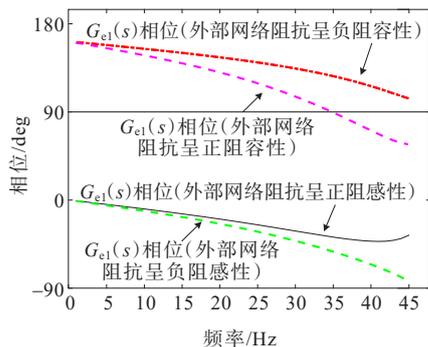


图6 外部网络不同阻抗特性下  $G_{e1}(s)$  相位变化规律

Figure 6 Phase variation of  $G_{e1}(s)$  with different impedance characteristics of external network

由图6可知,当外部网络阻抗为负阻容性时,  $G_{e1}(s)$  相位角一直位于  $90^\circ \sim 270^\circ$  之间,导致电气负阻尼,此时会引发系统次同步振荡。当外部网络阻抗特性为正阻感性时,此时  $G_{e1}(s)$  相位角一直位于  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间,电气阻尼为正,系统无次同步振荡风险。因此,容性电抗相比于感性电抗更容易与发电机感性电抗相互作用导致电气负阻尼,与阻抗法稳定性分析结果一致。在功率外环附加阻尼控制时柔直阻抗的变化规律如图7所示。

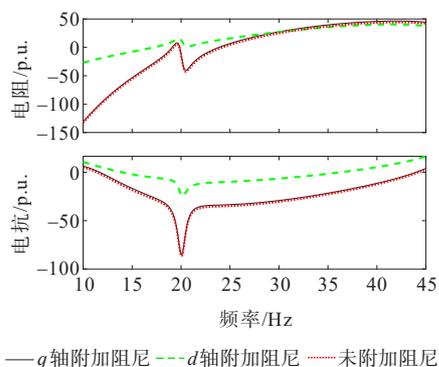


图7 不同位置附加阻尼时柔直阻抗变化规律

Figure 7 Variation of HVDC impedance with additional damping at different positions

由图7可知,柔直阻抗  $Z_{mmc}$  在 20 Hz 附近频段呈负电阻和容性,所以复转矩系数的电气负阻尼与柔直阻抗有关。

### 2.3 柔直整流站控制环节对柔直阻抗的影响

下面主要分析  $dq$  轴功率外环对柔直部分阻抗特性的影响及作用路径。柔直阻抗推导过程参考文献[23-24],传递函数框图如图8所示,可以看出功率外环在系统阻抗传递函数中的作用。

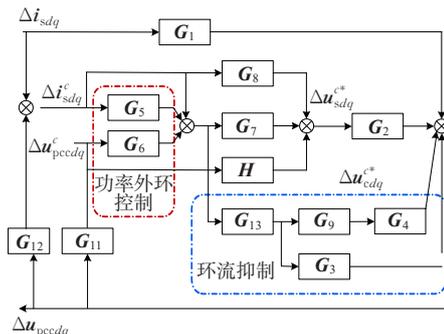


图8 柔直阻抗小信号传递函数框图

Figure 8 Small signal transfer function of HVDC impedance

其阻抗传递函数可表示为

$$\Delta v_{pccdq}(s) = Z_{mmc} \Delta i_{sdq}(s) \quad (7)$$

式中,  $\Delta v_{pccdq}$  为 pcc 点  $dq$  轴电压变化量,  $\Delta i_{sdq}$  为交流侧  $dq$  轴电流变化量。

环流是由于整流站中各相子模块电容电压不平衡造成的,当各子模块电容电压均衡时,环流很小,对柔直阻抗外特性影响较小。故将环流抑制部分传递函数略去,将柔直阻抗简化,功率外环作用路径在传递函数中以红线表示,将图8变形为如图9所示传递函数框图。

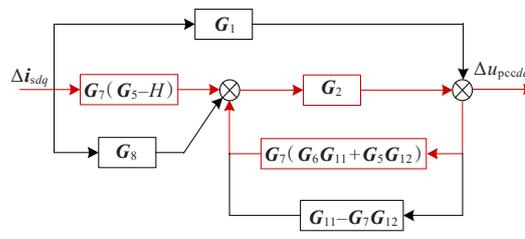


图9 柔直阻抗小信号简化传递函数

Figure 9 Simplified small signal transfer function of HVDC impedance

根据外环作用路径中的各传递函数矩阵形式,具体各表达式如下:

$$\begin{cases}
 G_5(s) = \begin{bmatrix} F_{PI}(s)u_{pccd0}^c & 0 \\ 0 & F_{QI}(s)u_{pccd0}^c \end{bmatrix} \\
 G_6(s) = \begin{bmatrix} F_{PI}(s)i_{sd0}^c & F_{PI}(s)i_{sq0}^c \\ -F_{QI}(s)i_{sq0}^c & F_{QI}(s)i_{sd0}^c \end{bmatrix} \\
 G_7(s) = -\begin{bmatrix} F_{II}(s) & 0 \\ 0 & F_{II}(s) \end{bmatrix} \\
 G_8(s) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_0 L_t \\ \omega_0 L_t & 0 \end{bmatrix} \\
 G_{11}(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - u_{pccd0} F_{PLL}(s) \end{bmatrix} \\
 G_{12}(s) = \begin{bmatrix} 0 & Q_0 F_{PLL}(s)/u_{pcc0} \\ 0 & P_0 F_{PLL}(s)/u_{pcc0} \end{bmatrix}
 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $F_{PI}(s)$ 、 $F_{QI}(s)$ 、 $F_{II}(s)$ 和 $F_{PLL}(s)$ 分别为外环  $d$ 轴、外环  $q$ 轴、内环电流和锁相环控制函数;上标  $c$ 为柔直控制坐标系下的参数; $L_t$ 为桥臂等效电感; $P_0$ 、 $Q_0$ 分别为有功、无功参考值。

式(8)中,  $G_5$ 、 $G_6$ 对应外环控制,  $G_7$ 、 $G_8$ 对应内环控制, 4个矩阵均主、副对角线元素绝对值分别相等, 因此对应  $dq$ 轴控制效果。且由于  $G_5$ 中电压电流初值较大, 所以在柔直阻抗中, 功率外环对阻抗有较大影响。

#### 2.4 $dq$ 轴功率外环附加阻尼控制对电气阻尼影响不同的分析

当忽略环流部分时,  $G_2$ 的表达式可简化为

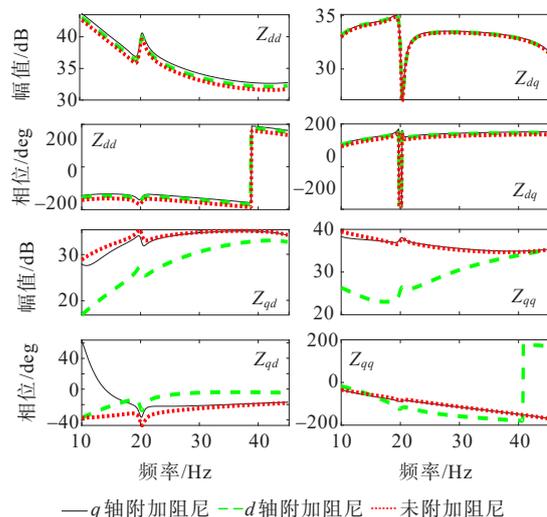
$$G_2(s) = \frac{-N}{16Cs} \begin{bmatrix} 2M_{d0}i_{sd0} & -(M_{d0} + M_{q0})i_{sq0} \\ M_{q0}i_{sd0} + M_{q0}i_{sq0} & M_{d0}i_{sq0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $N$ 为柔直桥臂子模块数;  $C$ 为子模块电容值;  $M_{d0}$ 、 $M_{q0}$ 分别为调制信号  $dq$ 轴初值;  $i_{sd0}$ 、 $i_{sq0}$ 分别为交流侧  $dq$ 轴电流初值。

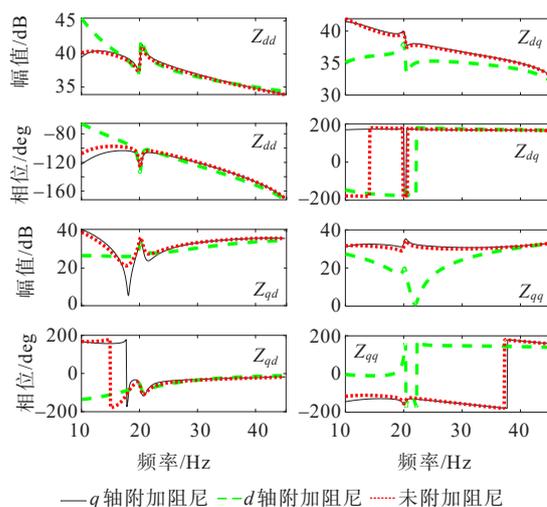
此时,  $G_2$ 为非对称矩阵。  $G_{11}$ 、 $G_{12}$ 对应锁相环节, 也为非对称矩阵, 导致柔直  $dq$ 轴阻抗为非对称矩阵, 影响  $dq$ 轴控制效果。由  $G_2$ 、 $G_{11}$ 和  $G_{12}$ 的具体表达式可知, 均与系统初始运行参数(电压、电流等)有关。当初始运行状态发生变化时, 对应3个矩阵也会发生相应变化, 从而对应的控制效果也会相应变化。当图2柔直系统仅传输有功功率和仅传输无功功率时, 在外环  $dq$ 轴分别附加阻尼控制时的柔直阻抗特性如图10所示。

由图10(a)可知, 此时  $G_2$ 、 $G_{11}$ 和  $G_{12}$ 主要影响柔

直的  $qd$ 轴和  $qq$ 轴阻抗。  $d$ 轴功率外环施加附加阻尼控制后, 柔直阻抗变化明显, 控制效果远优于  $q$ 轴附加阻尼控制。由图7可知, 此时柔直阻抗由负电阻变为正电阻, 次同步振荡风险大大降低。



(a) 只输出有功时柔直阻抗变化规律



(b) 只输出无功时柔直阻抗变化规律

图10 不同位置附加阻尼时柔直  $dq$ 轴阻抗变化规律

Figure 10 Variation of  $dq$  axis impedance with additional damping at different positions

由图10(b)可知, 此时  $G_2$ 、 $G_{11}$ 和  $G_{12}$ 对应元素主要影响柔直的  $dq$ 轴和  $qq$ 轴阻抗。与只输出有功情况相反, 在只输出无功情况下  $q$ 轴功率外环附加阻尼控制后, 柔直阻抗变化明显, 控制效果远优于  $d$ 轴附加阻尼控制。

由于当系统运行状态确定时, 系统稳态初值(功率、电压、电流)也确定, 功率外环  $dq$ 轴控制参数取值相同, 所以功率外环附加阻尼控制的效果由系

统初始运行状态值决定,且主要与柔直输出有功功率、无功功率有关。系统输出功率初值通过影响 $G_2$ 、 $G_{11}$ 和 $G_{12}$ 中元素,影响了 $dq$ 轴外环控制效果,导致附加控制时控制效果的不同。

### 3 时域仿真验证

针对图1火电机组经柔直送出系统建立PSCAD时域仿真模型,保持系统运行工况不变,柔直整流站功率外环附加阻尼控制策略如图3所示。仿真中在第2s时,设置柔直送端高压母线上发生经过渡电阻的单相接地瞬时故障。柔直只输出有功功率条件下,分别在柔直功率外环 $d$ 轴和 $q$ 轴附加阻尼控制,时域仿真结果如图11所示。可知,功率外环未附加阻尼控制前,轴系扭振模式1收敛,模式2、3振荡发散。功率外环 $d$ 轴附加阻尼控制后,模式1振荡未受到影响,仍收敛,模式2、3振荡由发散变为收敛。而功率外环 $q$ 轴附加阻尼控制后,模式2、3仍发散,功率外环 $d$ 轴附加阻尼优于 $q$ 轴。时域仿真计算结果与理论分析结果图5吻合,验证了功率外环 $d$ 轴附加阻尼控制抑制火电机组次同步振荡的有效性。

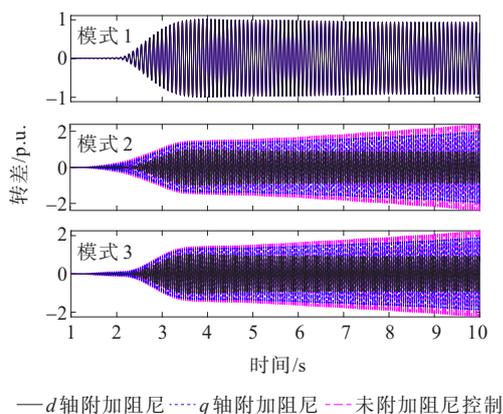


图11 输出有功下外环 $dq$ 轴分别附加阻尼时扭振模式

Figure 11 Torsional vibration curves of  $dq$  axis with additional damping under active power output mode

相同工况下,在柔直只输出无功功率的情况下分别在柔直功率外环 $d$ 轴和 $q$ 轴附加阻尼控制,时域仿真结果如图12所示。可知,功率外环 $q$ 轴附加阻尼控制对轴系扭振模式2、3的抑制效果要远优于 $d$ 轴附加阻尼控制, $d$ 轴附加阻尼控制对轴系扭振模式2、3的也有一定的抑制效果,减小火电机组次同步振荡风险,仿真计算结果与理论分析结果吻合。

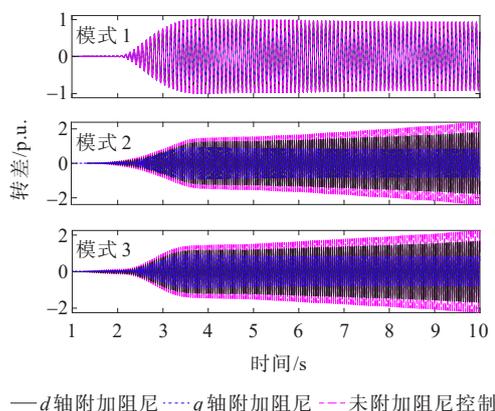


图12 输出无功下外环 $dq$ 轴分别附加阻尼时扭振模式

Figure 12 Torsional vibration curves of  $dq$  axis with additional damping under reactive power output mode

### 4 结语

本文利用电气阻尼法研究了柔直送出系统中火电机组电气负阻尼关键影响环节和参数,提出一种基于功率外环附加阻尼控制抑制火电机组次同步振荡策略,并分析了 $d$ 轴和 $q$ 轴不同位置附加阻尼控制的抑制效果不同原因。

通过柔直功率外环上附加阻尼控制,等效改变负阻尼频段的外环比例参数,能够抑制系统次同步振荡。柔直功率外环 $d$ 轴和 $q$ 轴附加阻尼控制对电气阻尼的影响差别很大,通过建立复转矩系数传递函数,外环 $d$ 轴和 $q$ 轴附加阻尼控制通过影响柔直端口阻抗特性进而影响电气阻尼,控制效果的强弱与柔直初始运行状态,主要是与传输有功功率、无功功率大小有关。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李大虎,李佳,周悦,等.常规直流送端近区电网中调相机和柔性直流的无功协调控制[J].电力建设,2023,44(12):148-160.  
LI Dahu, LI Jia, ZHOU Yue, et al. Reactive power-coordinated control of a synchronous condenser and

- VSC-HVDC in the sending-side near region power grid of an LCC-HVDC[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12):148-160.
- [3] 王杨,王超群,晁苗苗,等.基于同步相量数据幅频特征的次超同步振荡模式辨识[J]. *电力系统保护与控制*, 2023,51(19):1-11.  
WANG Yang, WANG Chaoqun, CHAO Miaomiao, et al. Sub-and super-synchronous oscillation mode identification based on amplitude and frequency characteristics of synchronous phasor data[J]. *Power System Protection and Control*, 2023,51(19):1-11.
- [4] 许洪华,邵桂萍,鄂春良,等.我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. *发电技术*, 2023, 43(4):484-491.  
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 43(4):484-491.
- [5] 雷傲宇,汪林光,梅勇,等.多端柔性直流电网的中高频振荡特性分析[J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(7):55-60.  
LEI Aoyu, WANG Linguang, MEI Yong, et al. An analysis of medium & high-frequency oscillation characteristics in multi-terminal flexible HVDC Networks [J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(7):55-60.
- [6] 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.
- [7] [1]刘博昊,肖仕武.柔性直流引发火电机组次同步振荡的电气负阻尼关键因素分析[J/OL]. *现代电力*:1-9 [2023-06-07]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0347>.  
LIU Bohao, XIAO Shiwu. Key factors analysis of negative electrical damping for sub-synchronous oscillation in thermal power units induced by flexible-HVDC[J/OL]. *Modern Power*: 1-9[2023-06-07]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0347>.
- [8] 杨贵军,莫云晓,龙英云,等.模块化多电平换流器子模块检测技术研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(10):170-178.  
YANG Guijun, MO Yunxiao, LONG Yingyun, et al. Research on detection technology of sub-model of modular multilevel converter[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(10):170-178.
- [9] 孙银锋,刘金鑫,梁栋.基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. *智慧电力*, 2023,51(10):85-92.  
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. *Smart Power*, 2023,51(10):85-92.
- [10] 黄伟煌,李明,郭铸,等.基于小干扰稳定性的多端混合高压直流输电系统控制参数分析与优化方法[J]. *电网技术*, 2020,44(8):2941-2949.  
HUANG Weihuang, LI Ming, GUO Zhu, et al. Control parameter analysis and optimization method of multi-terminal hybrid HVDC transmission system based on small signal stability[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8):2941-2949.
- [11] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. *电网技术*, 2017,41(4):1035-1042.  
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4):1035-1042.
- [12] LÜ J, CAI X, AMIN M, et al. Sub-synchronous oscillation mechanism and its suppression in MMC-based HVDC connected wind farms[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, 12(4):1021-1029.
- [13] 李生虎,叶剑桥,陈东.基于无源控制的DFIG并网次同步控制相互作用抑制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023,51(11):77-85.  
LI Shenghu, YE Jianqiao, CHEN Dong. Passive control strategy to mitigate sub-synchronous control interaction of DFIG-based integrated power systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2023,51(11):77-85.
- [14] 张学广,邱望明,方冉,等.基于变流器改进控制的双馈风电机组SSO抑制方法[J]. *电机与控制学报*, 2020,24(2):1-9.  
ZHANG Xueguang, QIU Wangming, FANG Ran, et al. SSO mitigation method of DFIG based on improved control of converter[J]. *Electric Machines and Control*, 2020,24(2):1-9.
- [15] 顾文,吕万,杨宏宇,等.电力系统次同步振荡的检测技术综述[J]. *电测与仪表*, 2022,59(7):9-18.  
GU Wen, LÜ Wan, YANG Hongyu, et al. Review of detection technology of sub-synchronous oscillation in power systems[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022,59(7):9-18.
- [16] 徐友平,张珂,潘晓杰,等.渝鄂背靠背柔性直流附加阻尼控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2016,44(18):163-169.  
XU Youping, ZHANG Ke, PAN Xiaojie, et al. Damping control based on back to back VSC-HVDC connecting Chongqing and Hubei Power Grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2016,44(18):163-169.
- [17] WANG S J, XU Z, WANG S. New findings on bypass damping filter in increasing subsynchronous resonance damping of series compensated system[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(13):1718-1726.

- reactive power support of DG and switch reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 685-695+948.
- [19] 贺帅佳, 高红均, 刘俊勇, 等. 计及需求响应柔性调节的分布鲁棒 DG 优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(08): 2253-2264+8.
- HE Shuaijia, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. Distributionally robust optimal DG allocation model considering flexible adjustment of demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(08): 2253-2264+8.
- [20] 李则衡, 陈磊, 路晓敏, 等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187-2194.
- LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187-2194.
- [21] 任智君, 郭红霞, 杨苹, 等. 含高比例可再生能源配电网灵活资源双层优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 33-38.
- REN Zhijun, GUO Hongxia, YANG Ping et al. Double-layer optimal configuration of flexible resources with high proportion of renewable energy distribution network [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(9): 33-38.
- [22] WU T, ZHANG Y J, TANG X Y. A VSC-based BESS model for multi-objective OPF using mixed integer SOCP[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2541-2552.
- [23] 王守相, 陈思佳, 谢颂果. 考虑安全约束的交直流配电网储能与换流站协调经济调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 85-91.
- WANG Shouxiang, CHEN Sijia, XIE Songguo. Security-constrained coordinated economic dispatch of energy storage systems and converter stations for AC/D distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 85-91.
- [24] ZHAO C Y, GUAN Y P. Data-driven stochastic unit commitment for integrating wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2587-2596.
- [25] 李雪晴. 论文附录[EB/OL]. [https://pan.baidu.com/s/1Rm6c\\_dQmejb9fYVFFOz7g?pwd=5x3f](https://pan.baidu.com/s/1Rm6c_dQmejb9fYVFFOz7g?pwd=5x3f) (提取码: 5x3f), 2022-06-14.
- LI Xueqing. Appendix to the paper[EB/OL]. [https://pan.baidu.com/s/1Rm6c\\_dQmejb9fYVFFOz7g?pwd=5x3f](https://pan.baidu.com/s/1Rm6c_dQmejb9fYVFFOz7g?pwd=5x3f) (extraction code: 5x3f), 2022-06-14.
- [26] GAO H J, LIU J Y, WANG L F. Robust coordinated optimization of active and reactive power in active distribution systems. [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4436-4447.
- [27] 胡戎, 邱晓燕, 张志荣. 计及灵活性资源的交直流混合配电网双层优化[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2259-2268.
- HU Rong, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong. Bi-level optimization of AC/DC hybrid distribution network considering flexible resources[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2259-2268.

(上接第 27 页 Continued from page 27)

- [18] 周彦彤, 郝丽丽, 王昊昊, 等. 大容量风电场柔直并网系统的送/受端次同步振荡分析与抑制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 100-106.
- ZHOU Yantong, HAO Lili, WANG Haohao, et al. Analysis and suppression of SSO at sending/receiving end in VSC-HVDC system connected large-capacity wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 100-106.
- [19] 任健淼, 肖仕武. 基于频域振荡模式的次/超同步分量可观可控分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 30-39.
- REN Jianmiao, XIAO Shiwu. Observability and controllability analysis of sub-/ super-synchronous components based on frequency domain oscillation mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 30-39.
- [20] 江桂芬, 孙海顺, 陈霞, 等. 宁夏多直流外送系统 SSO 特性分析及次同步阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 30-38.
- JIANG Guifen, SUN Haishun, CHEN Xia, et al. SSO characteristic analysis and subsynchronous damping controller design of Ningxia multi-DC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 30-38.
- [21] 米季炯. 火电机组经柔直系统送出的次同步振荡阻尼特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- MI Jijiong. Research on the damping characteristics of the subsynchronous oscillation of thermal power units connected via MMC-HVDC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [22] HARNEFORS L. Analysis of subsynchronous torsional interaction with power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 305-313.
- [23] KHAZAEI J, BEZA M, BONGIORNO M. Impedance analysis of modular multi-level converters connected to weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4015-4025.
- [24] 鲁晓军, 林卫星, 安婷, 等. MMC 电气系统动态相量模型统一建模方法及运行特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5479-5491+5724.
- LU Xiaojun, LIN Weixing, AN Ting, et al. A unified dynamic phasor modeling and operating characteristic analysis of electrical system of MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5479-5491+ 5724.