



电力自动化设备

*Electric Power Automation Equipment*

ISSN 1006-6047, CN 32-1318/TM

## 《电力自动化设备》网络首发论文

题目: 抑制风电-柔直外送系统次同步振荡的并联 VSC 型次同步阻尼控制器  
作者: 李浩志, 李景一, 杨建军, 谢小荣  
DOI: 10.16081/j.epae.202201030  
收稿日期: 2021-08-04  
网络首发日期: 2022-01-29  
引用格式: 李浩志, 李景一, 杨建军, 谢小荣. 抑制风电-柔直外送系统次同步振荡的并联 VSC 型次同步阻尼控制器[J/OL]. 电力自动化设备. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202201030>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 抑制风电-柔直外送系统次同步振荡的 并联VSC型次同步阻尼控制器

李浩志<sup>1</sup>, 李景一<sup>1,2</sup>, 杨建军<sup>2</sup>, 谢小荣<sup>1</sup>

(1. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311112)

**摘要:**风电经柔性直流输电(简称“柔直”)系统接入交流电网已经成为陆上/海上风电并网的主要方式之一,但风电与柔直系统存在控制相互作用引发次同步振荡的风险。为抑制此类振荡,提出一种独立于柔直系统和风电机组变流器的并联电压源变流器(VSC)型次同步阻尼控制器。该控制器使用集电线路电压作为输入信号,提取信号中的振荡模态后调制其幅值、相位,然后利用并联VSC向系统注入次同步频率的电流来抑制振荡。基于复阻抗法对控制器参数进行了优化设计。仿真结果表明,所提出的控制器能在不同工况下有效抑制振荡。

**关键词:**风电场;柔性直流输电;模块化多电平变流器;阻抗分析;次同步振荡抑制

**中图分类号:**TM 712;TM 614

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202201030

## 0 引言

风力发电规模近年来增长迅猛,2020年我国风力发电量达到4665亿kW·h,占全部发电量的6.1%<sup>[1]</sup>。大规模风电并网的理想方案之一是基于模块化多电平变流器(MMC)的高压直流(HVDC)输电技术,其兼具模块化程度高、输出电压畸变率小及控制灵活等优点<sup>[2]</sup>。然而,MMC和风电机组之间存在控制相互作用引发次同步振荡(SSO)的风险,会对系统安全稳定运行造成不良影响<sup>[3-4]</sup>。如我国南汇和南澳等柔性直流输电(简称“柔直”)系统在调试或运行中出现了次同步频率范围内的振荡现象<sup>[5-7]</sup>。次同步振荡可能导致风电机组脱网或柔直系统停运,威胁设备和系统安全。因此,研究风电-柔直外送系统的次同步振荡抑制策略具有实际意义。

风电-柔直外送系统的次同步振荡抑制措施可以分为优化风电/柔直变流器的控制策略和采用额外装置2类。第一类可以分为附加控制环节和优化控制器参数。附加控制环节包括:在风电机组和整流侧换流站控制中附加阻尼控制<sup>[3]</sup>;在整流侧换流站电流内环附加阻尼控制<sup>[4]</sup>;在直驱风电机组网侧

变流器的电压外环或电流内环附加阻尼控制<sup>[8-9]</sup>。优化控制器参数包括整流侧换流站交流电压控制器的参数优化<sup>[3]</sup>、锁相环参数优化<sup>[10]</sup>和风电机组控制器参数优化<sup>[11]</sup>。然而,对于风电场、柔直系统等含有多变流器的应用场景,基于变流器控制的振荡抑制方案需要对变流器逐一进行停运改造,而且附加控制环节可能对原有控制效果产生不利影响。第二类方法需要安装额外装置,主要包括:文献[12]提出的基于阻塞滤波器的振荡抑制方法;利用柔性交流输电系统(FACTS)装置,如可控串联补偿(TCSC)<sup>[13]</sup>、静止同步补偿器(STATCOM)<sup>[14]</sup>等抑制风电的次同步振荡。然而滤波器存在体积大、损耗高及经济效益低等问题<sup>[5]</sup>;FACTS装置的容量通常大于专门为振荡抑制设计的装置<sup>[13,15]</sup>。因此,还需进一步研究成本较低、适用性较强的风电-柔直外送系统的次同步振荡抑制方法。

本文提出一种并联电压源变流器(VSC)型次同步阻尼控制器SSDC(Shunt-VSC Subsynchronous Damping Controller)。首先定量分析了次同步振荡特性,验证了振荡产生的机理;在此基础上,提出了控制器的控制策略和结构,针对工况变化进行了参数优化设计;最后通过阻抗模型和时域仿真验证了所提方法的有效性。结果表明该控制器在不同工况下均能抑制风电-柔直外送系统的次同步振荡。

## 1 风电-柔直外送系统次同步振荡问题的分析

风电-柔直外送系统面临控制相互作用进而引发次同步振荡的风险。为定量分析振荡特性,本节首先介绍双馈风电场经柔直外送系统的结构,然后

收稿日期:2021-08-04;修回日期:2021-12-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51737007, 51925701);清华大学-新南威尔士大学自主科研国际合作专项(2020Z02NSW);中国电建集团华东勘测设计研究院科技项目(KY-2020-XNY-02-02)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51737007, 51925701), UNSW-Tsinghua Collaborative Research Seed Grants(2020Z02NSW) and the Science and Technology Project of Power China Huadong Engineering Corporation(KY2020-XNY-02-02)

介绍基于阻抗模型的分析方法及分析结果。

### 1.1 系统结构

典型的双馈风电场经柔直外送系统结构如图 1 所示。风电场视作完全相同的双馈风电机组模型的聚合,其总容量为 1000 MW,单台风电机组的额定容量为 2 MW,控制框图见附录 A 图 A1。风电场出口经 35 kV / 525 kV 升压变压器、交流线路、500 kV / 375 kV 降压变压器连接至 MMC-HVDC 系统,再经由 350 kV / 525 kV 升压变压器接入交流电网。为简化模型,对其中的交流电压等级进行了折算。MMC-HVDC 系统由风电场侧换流站、直流线路、交流电网侧换流站组成;风电场侧换流站采用定交流电压和频率控制,保持风电场公共连接点(PCC)交流电压的幅值和频率稳定,控制框图见附录 A 图 A2;交流电网侧换流站采用定直流电压和无功功率控制。换流站的额定容量均为 1000 MW,直流电压等级为  $\pm 350$  kV。交流电网用理想电压源表示,其电压、频率分别为 525 kV、50 Hz。

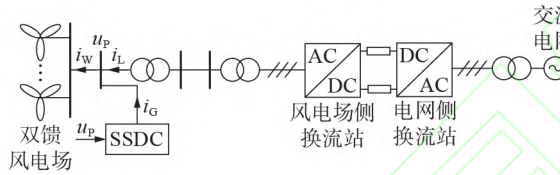


图 1 双馈风电场经柔直送出系统结构

Fig.1 Structure of doubly-fed wind farm connected by flexible DC sending system

### 1.2 基于频域聚合阻抗的次同步振荡分析方法

阻抗分析法是分析振荡问题中较为通用的方法之一<sup>[13,16]</sup>,具有明确的物理意义。首先要建立待分析系统各部分的阻抗模型。由于变流器的频率耦合效应,文献<sup>[17]</sup>建立了频率耦合阻抗模型,采用二维矩阵代替阻抗的一维表达式,如式(1)所示。由于商业机密等原因,实际工程中变流器的详细参数通常难以获取,难以通过数学推导得到阻抗模型。对于这种“黑灰箱”模型,可以采用注入小信号谐波扰动,然后测量对应电压电流的方式得到小信号阻抗的频率特性曲线<sup>[17]</sup>。

$$\mathbf{Z}_w = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Z}_w$ 为风电场侧的频率耦合阻抗; $Z_{11}$ 和 $Z_{22}$ 分别为谐波频率和耦合频率下的自阻抗; $Z_{12}$ 和 $Z_{21}$ 为对应的互阻抗,反映频率耦合效应。

获得系统各部分阻抗后,可以沿着振荡路径形成聚合阻抗<sup>[18]</sup>,如式(2)所示。

$$\mathbf{Z}_\Sigma = \mathbf{Z}_w + \mathbf{Z}_{MMC} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Z}_\Sigma$ 为聚合阻抗; $\mathbf{Z}_w$ 为风电场侧的等效阻抗; $\mathbf{Z}_{MMC}$ 为柔直侧的等效阻抗。

聚合阻抗 $\mathbf{Z}_\Sigma$ 行列式 $D_z(s)$ 的零点和极点会在其虚部 $X_D$ (等效电抗)或实部 $R_D$ (等效电阻)的频率特性曲线上产生过零点,根据 $X_D$ 过零点 $\omega_r$ 和斜率 $k_{DX}(\omega_r)$ 可以判断出系统稳定性<sup>[18]</sup>。当 $X_D$ 存在过零点且 $R_D(\omega_r)$ 接近0时,若 $k_{DX}(\omega_r)R_D(\omega_r) < 0$ ,则振荡模式不稳定。在该过零点的微小邻域内可以算出系统零点的实部和虚部,即对应振荡模式的阻尼和频率<sup>[18]</sup>。令 $A = k_{DX}(\omega_r)$ ( $k_{DX}(\omega_r)$ 为实部 $R_D$ 频率特性曲线的斜率), $B = k_{DX}(\omega_r)$ ,系统零点的计算公式为:

$$\begin{cases} \sigma = -\frac{B}{A^2 + B^2} R_D(\omega_r) \\ \Delta\omega = \frac{A}{B} \sigma \\ \omega_s = \omega_r + \Delta\omega \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\sigma$ 为系统零点的实部,其值为正则系统不稳定,其值为负则系统稳定; $\omega_s$ 为系统零点的虚部,通常 $\omega_r \approx \omega_s$ 。

### 1.3 次同步振荡特性分析结果及验证

在PSCAD/EMTDC中搭建1.1节所述系统的详细电磁暂态仿真模型进行测试,设风电机组台数为120台,系统参数详见附录A表A1、A2。首先采用扰动测试法得到仿真模型的 $\mathbf{Z}_w$ 和 $\mathbf{Z}_{MMC}$ <sup>[17]</sup>,按式(2)形成聚合阻抗。聚合阻抗行列式的等效电抗和等效电阻的频率特性曲线见图2。图中等效电抗过零点满足 $R_D(\omega_r)k_{DX}(\omega_r) < 0$ ,则在过零点频率 $\omega_r = 15.68$  Hz附近存在不稳定振荡。由式(3)得到不稳定振荡模式为 $\omega_s = 15.75$  Hz,  $\sigma = 0.44$  s<sup>-1</sup>。阻抗测量结果表明:在特定频率下,双馈风电场等效为负电阻与电感串联,而MMC-HVDC等效为电阻和电容,此时系统构成了含负电阻的RLC串联电路,引发次同步振荡。

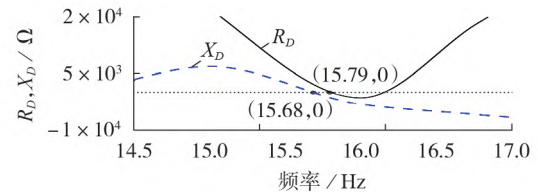


图 2  $X_D$ 、 $R_D$ 的频率特性曲线

Fig.2 Frequency characteristic curves of  $X_D$  and  $R_D$

进行时域仿真验证以上理论分析的正确性。设风电机组在0.5 s时投运,初始台数为10台(总功率为20 MW),每0.2 s增加20台风电机组,1.7 s达到120台风电机组后保持不变(和前述阻抗分析的台数一致),得到风电场送出的电流和功率波形如图3(a)所示(图中电流、功率为标幺值,后同)。约3 s左右振荡发生,其幅值在5 s左右达到峰值。图3(b)是对3~4 s内电流数据进行快速傅里叶变换(FFT)分析的结果,包含16 Hz次同步分量和对应耦合频率84 Hz



的超同步分量,幅值分别为基波的 14.33% 和 7.98%。进一步仿真表明,目标系统在并网风电机组台数大于等于 120 台时,系统存在次同步振荡风险。

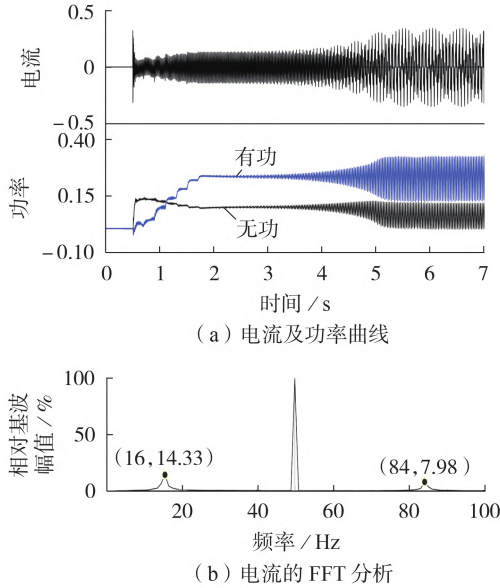


图3 双馈风电场经柔直外送系统电流、功率曲线及电流FFT分析结果(120台风电机组)

Fig.3 Current and power curves of doubly-fed wind farm connected by flexible DC sending system and FFT analysis result of current(120 wind turbines)

在频率分辨率为 1 Hz 的情况下,时域仿真中的振荡频率与阻抗分析的振荡频率 $\omega_s$ 基本一致。计算振荡分量随时间变化的幅值,进行线性拟合得到其发散率约为 $0.49 \text{ s}^{-1}$ ;仿真结果与理论分析的 $\sigma$ 较为接近。因此,仿真结果证明了阻抗模型分析方法能精确计算目标系统的不稳定振荡模式。

## 2 SSDC

第1节分析结果表明,特定工况下风电场和柔直系统之间阻抗的动态相互作用可能导致系统聚合阻抗特性存在不稳定的振荡模式。因此可以通过安装额外装置重塑系统在次同步频率下的阻抗特性,从而抑制振荡。本节提出SSDC,其接入点对于电力系统而言,可等效为以电压为输入信号的可控阻抗。以下分别介绍SSDC基本原理、结构和参数设计以及其与STATCOM附加阻尼控制的对比情况。

### 2.1 SSDC 基本原理和结构

SSDC通过并联VSC注入次同步电流,实现对风电场的阻抗重塑,改变系统在次同步频率下的聚合阻抗特性,从而抑制振荡。根据图1所示位置安装SSDC,其在接入点通常表现为正电阻和电感特性。SSDC的结构如图4所示。

接入控制器后的风电场阻抗变为:

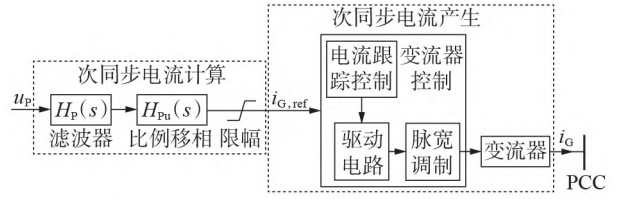


图4 SSDC 结构

Fig.4 Configuration of SSDC

$$\mathbf{Z}'_{\text{w}} = \frac{\mathbf{U}_{\text{p}}}{\mathbf{I}_{\text{L}}} = \frac{\mathbf{U}_{\text{p}}}{\mathbf{I}_{\text{w}} - \mathbf{I}_{\text{G}}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Z}'_{\text{w}}$ 为接入SSDC后的风电场阻抗; $\mathbf{U}_{\text{p}}$ 为PCC处电压相量; $\mathbf{I}_{\text{L}}$ 为流入PCC处的电流相量; $\mathbf{I}_{\text{w}}$ 为流出PCC处的电流相量; $\mathbf{I}_{\text{G}}$ 为SSDC注入的电流相量。

为实现振荡抑制功能,SSDC由次同步电流计算、产生环节2个部分构成。次同步电流计算环节根据输入的电压信号计算抑制电流的参考信号;次同步电流产生环节根据输入的参考信号,通过并联VSC向系统注入电流。下面依次进行介绍。

#### 1) 次同步电流计算环节。

如图4所示,次同步电流计算环节对输入PCC处的电压信号 $u_{\text{p}}$ 进行处理,经过滤波、比例移相、限幅环节得到参考信号 $i_{\text{G,ref}}$ 。其中滤波环节主要作用是提取出输入信号中的次同步分量;比例移相环节采用超前-滞后控制产生相应的参考电流信号;限幅环节根据系统容量进行配置。

#### a) 滤波环节。

滤波环节由1个带通滤波器和2个带阻滤波器组合而成,主要功能是提取振荡频率的信号并排除工频和耦合频率的影响。滤波器传递函数 $H_{\text{F}}(s)$ 由带通滤波器的传递函数 $H_{\text{BP}}(s)$ 和带阻滤波器的传递函数 $H_{\text{BR}}(s)$ 组成,其表达式分别见式(5)和式(6)。

$$H_{\text{BP}}(s) = \frac{G_{\text{BP}} \omega_{\text{BP}} s}{s^2 + 2\xi_{\text{BP}} \omega_{\text{BP}} s + \omega_{\text{BP}}^2} \quad (5)$$

$$H_{\text{BR}}(s) = \frac{G_{\text{BR}} (s^2 + \omega_{\text{BR}}^2)}{s^2 + 2\xi_{\text{BR}} \omega_{\text{BR}} s + \omega_{\text{BR}}^2} \quad (6)$$

式中: $G_{\text{BP}}$ 和 $G_{\text{BR}}$ 分别为 $H_{\text{BP}}(s)$ 和 $H_{\text{BR}}(s)$ 的增益; $\omega_{\text{BP}}$ 为带通滤波器的特征频率(取次同步振荡频率); $\omega_{\text{BR}}$ 为带阻滤波器的特征频率(分别取工频和耦合频率); $\xi_{\text{BP}}$ 和 $\xi_{\text{BR}}$ 分别为带通和带阻滤波器的阻尼系数。

#### b) 比例移相环节。

比例移相环节采用超前-滞后控制来实现对信号的相移和幅值增益,其传递函数 $H_{\text{Pu}}(s)$ 见式(7)。

$$H_{\text{Pu}}(s) = K_{\text{u}} \left( \frac{1 - T_{\text{u}} s}{1 + T_{\text{u}} s} \right)^n \quad (7)$$

式中: $K_{\text{u}}$ 为增益; $T_{\text{u}}$ 为积分系数; $n$ 为移相环节个数。 $n=2$ 时移相环节对信号的相移 $\theta_s$ 可以表示为:

$$\theta_s = 4\arctan(T_u s) \quad (8)$$

该控制结构有如下优点:输入信号为PCC处电压,较易获取;控制参数少且意义明确,便于根据所需相移和幅值增益进行整定。

## 2) 次同步电流产生环节。

如图4所示,次同步电流产生环节可以采用并联VSC来实现。VSC跟踪输入的参考电流信号,输出相应的次同步电流 $i_c$ 。变流器控制环节包括电流跟踪控制、驱动电路和脉宽调制。输出电流的频率范围需根据特定工程场景设计,应当包含振荡电流的频率范围。不同于传统的工频变流器,产生次同步频率电流的变流器需要合理选择直流电容和连接电抗,还需根据具体应用时的振荡特性及安装位置设计容量、电压和输出电流幅值等参数。目前已有产生次同步频率电流变流器设备的成熟设计方案<sup>[19]</sup>。

## 2.2 SSDC 参数设计

根据滤波器和比例移相环节的传递函数,输出电流信号和输入电压信号之间的关系可以表示为:

$$i_c = H_F(s) H_{Pu}(s) u_p \quad (9)$$

线路电流可以表示为:

$$i_L = i_w - i_c = i_w - H_F(s) H_{Pu}(s) u_p \quad (10)$$

故式(4)可以表示为:

$$Z'_w = \frac{U_p}{I_L} = \frac{1}{Z_w^{-1} - H_F(s) H_{Pu}(s)} \quad (11)$$

因此,系统聚合阻抗可以表示为:

$$Z_\Sigma = \frac{1}{Z_w^{-1} - H_F(s) H_{Pu}(s)} + Z_{MMC} \quad (12)$$

由式(12)可知,接入SSDC可以改变系统聚合阻抗特性,使得系统零点实部 $\sigma$ 由正变负,在 $\omega_s$ 处由不稳定变为稳定。为了控制器设计的直观、简便,式(4)、(11)、(12)仅考虑聚合阻抗矩阵的主对角元素<sup>[20]</sup>。

风电-柔直外送系统的实际运行工况极为复杂,涉及风速、风电机组台数和电网侧阻抗变化等多种影响因素。因此需采用优化算法整定SSDC参数,实现各种工况下的振荡抑制。实际应用中难以求出所有工况的解析解,因此给定 $N$ 种工况来求解SSDC参数。定义参数优化问题的目标是最小化系统的零点实部 $\sigma$ 在 $N$ 种工况下的最大值,即在最差工况下也能够抑制振荡,此时参数优化问题的数学模型如式(13)所示。

$$\begin{cases} \min f = \max(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N) \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} |K_u| \leq K_{up} \\ 0 < T_u < T_{up} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\sigma_1 \sim \sigma_N$ 为 $N$ 种工况下系统的零点实部; $f$ 为 $N$ 个零点实部的最大值; $K_{up}$ 和 $T_{up}$ 分别为增益和积分系数的上限。该问题的求解可以采用遗传算法、序贯优化算法等非线性优化算法<sup>[21]</sup>,此处不再详细介绍。

本文分别以风电机组台数、风电机组出力水平、双馈风电场经柔直外送系统间交流输电线路长度为变量,设置如下工况:①工况1,风电机组台数由120台增加到500台,每次递增20台,递增次数为20次;②工况2,风电机组出力由总容量的10%增加到总容量的100%,每次递增总容量的10%,递增次数为10次;③工况3,交流线路长度由60 km增加到120 km,每次递增30 km,递增次数为3次。根据上述工况进行仿真,结果表明:并网风电机组台数增加将增大振荡风险,且频率随着风电机组台数增加而增加;交流输电线路影响相对较小,输电线距离缩短将减小振荡幅值;风电机组出力增加,振荡风险先增大后减小。将需优化的工况( $N=600$ )代入式(13),求解得到控制器的参数如表1所示。

表1 控制器参数

Table 1 Parameters of controller

| 控制环节    | 增益     | 阻尼系数 | 特征频率 / Hz | 积分系数  |
|---------|--------|------|-----------|-------|
| 带阻滤波器   | 1.5    | 0.5  | 50        |       |
| 带通滤波器   | 3      | 0.5  | 16        |       |
| 比例移相控制器 | -0.002 |      |           | 0.018 |

## 2.3 SSDC和STATCOM附加阻尼控制器的比较

本文所提出的SSDC和STATCOM附加阻尼控制器在装置设计、成本和控制策略上存在较大差异,主要包括:①SSDC根据振荡抑制需求,只产生次同步频率范围内的电流,STATCOM通常仅输出工频电流,附加阻尼控制后在原有控制信号的基础上进行叠加,输出电流从工频到次同步频率的变化过程中将导致变流器内部的直流电压发生波动<sup>[14]</sup>,因此并联VSC需要关注直流电容器和连接电抗器的选择;②SSDC仅需满足振荡抑制所需的容量,如本文算例中控制装置容量为5 MV·A,仅为风电场容量的0.5%,成本相对较低,而STATCOM需提供无功补偿,容量相对较大<sup>[13]</sup>,更适用于已经安装STATCOM的风电场;③SSDC并网后可等效为以电压为输入信号的可控阻抗,重塑系统在次同步频率下的阻抗特性,进而抑制振荡,STATCOM附加阻尼控制器采用一阶相位超前滤波器实现相移,利用查表法确定1~15 Hz下的相位补偿,从而抑制振荡<sup>[14]</sup>。

## 3 振荡抑制效果验证

### 3.1 SSDC投运后系统的稳定性分析

根据1.2节中提出的分析方法,对SSDC投运前、

后的系统进行稳定性分析,得到原有振荡频率附近的风电场侧阻抗频率曲线,如图5所示。由图可知,SSDC投运后,风电场电阻特性在振荡频率附近由负变正,增强了系统阻尼,避免了振荡的发生。SSDC投运后聚合阻抗行列式的频率特性如图6所示。由图可知, $X_D$ 、 $R_D$ 曲线均无过零点。由1.2节判据可知,SSDC投运后实现了对系统的阻抗重塑,使得系统由不稳定变为稳定。

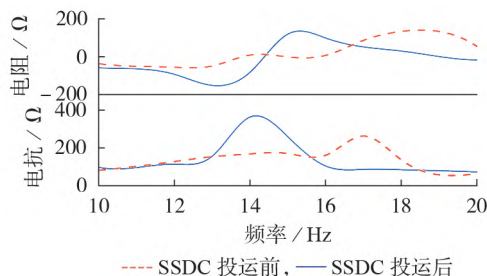


图5 SSDC投运前、后风电场侧阻抗频率特性曲线

Fig.5 Frequency characteristic curves of wind-farm-side impedance before and after SSDC put into operation

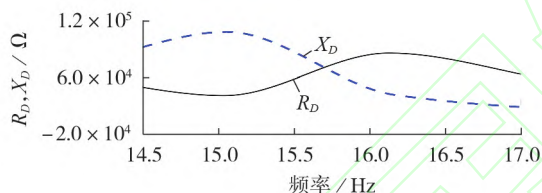


图6 SSDC投运后 $X_D$ 、 $R_D$ 的频率特性曲线

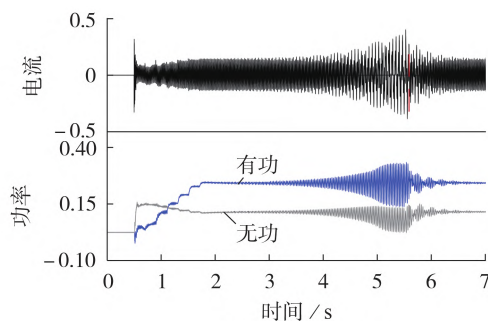
Fig.6 Frequency characteristic curves of  $X_D$  and  $R_D$  after SSDC put into operation

### 3.2 SSDC对系统振荡抑制效果的时域仿真验证

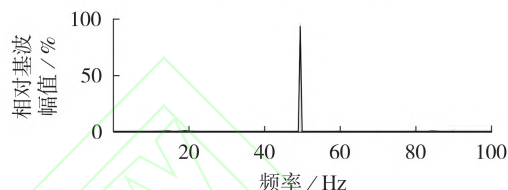
仿真验证SSDC对系统振荡的抑制效果。当并网风电机组达到120台时,系统在3s左右产生逐渐发散的振荡;5.5s时SSDC投运,次同步电流衰减较快,约1s内振荡波形逐渐收敛,风电场送出的电流和功率曲线见图7(a);6~7s内电流FFT分析结果见图7(b),电流仅含有频率为50Hz的基波分量。这说明SSDC投运后能有效地抑制次同步振荡。

为了验证风电机组台数变化时SSDC对系统振荡抑制效果,以风电机组台数变化工况为例进行分析,0.5s开始逐步增加并网风电机组到500台。设2s时SSDC投运,系统功率曲线如图8所示。由图可知,系统有功功率增加到1000MW并稳定运行,这说明SSDC实现了不同风电机组台数下的振荡抑制,显著提高了系统的稳定性。

设置并网风电机组为120台,每台机组出力从机组容量的50%增加至额定值时,功率曲线如图9所示。由图可知系统稳定运行,这说明当机组出力水平变化时,SSDC也能有效抑制振荡。



(a) 电流及功率曲线



(b) 电流的FFT分析

图7 SSDC投运后双馈风电场经柔直系统电流、功率曲线及电流FFT分析结果(120台机组)

Fig.7 Current and power curves of doubly-fed wind farm connected by flexible DC sending system and FFT analysis result of current after SSDC put into operation(120 wind turbines)

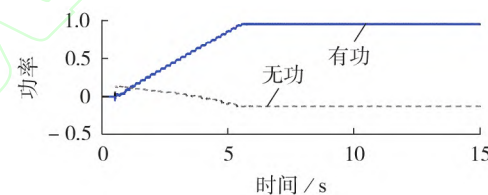


图8 风电机组台数变化时SSDC投运后系统功率曲线

Fig.8 Power curves of system after SSDC put into operation when number of wind turbine units change

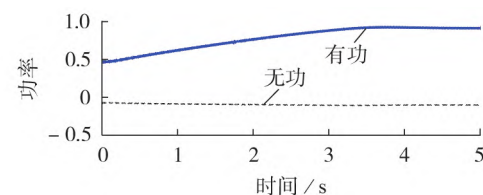


图9 风电机组出力变化时SSDC投运后系统功率曲线

Fig.9 Power curves of system after SSDC put into operation when output power of wind turbine units change

## 4 结论

为抑制风电-柔直外送系统中的次同步振荡问题,在振荡机理和系统阻抗特性分析的基础上,本文提出一种SSDC,设计了其控制策略并对其控制参数进行优化。所得结论如下:

1) 风电-柔直外送系统存在次同步振荡风险,基于阻抗法分析了其振荡机理,即特定频率下双馈风电机组呈现负电阻和电感特性,柔直系统呈现电阻



和电容特性,二者组合构成含负电阻的RLC振荡电路;

2)SSDC实现了对风电场的阻抗重塑,改变了系统的聚合阻抗特性,抑制了风电-柔直外送系统的次同步振荡;

3)风电-柔直外送系统中风电机组台数和出力水平对振荡特性有显著影响,时域仿真验证了SSDC在不同工况下均能有效抑制振荡。

然而,随着电力系统中新能源发电机组和电力电子设备比例的提高,振荡事件的频率范围将不断拓宽。因此,后续将进一步研究振荡辨识技术和自适应控制策略,提高抑制方法的鲁棒性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 2020年全国电力工业统计快报一览表[EB/OL]. [2021-01-20]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-292820>.
- [2] DEBNATH S, QIN J C, BAHRAANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [3] 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.
- [4] 吕敬, 蔡旭. 风电场柔性直流并网系统镇定器的频域分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4074-4085. LÜ Jing, CAI Xu. Frequency-domain analysis and design of stabilization controllers for wind farm integration through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4074-4085.
- [5] 胡小宝. 风电接入柔性直流的振荡分析与抑制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019. HU Xiaobao. Study on oscillation analysis and suppression method of wind power integration via flexible DC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [6] 薛安成, 付潇宇, 乔登科, 等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 118-128. XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 118-128.
- [7] 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.
- [8] 周佩朋, 宋瑞华, 李光范, 等. 直驱风电机组次同步振荡阻尼控制方法及其适应性[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 177-184. ZHOU Peipeng, SONG Ruihua, LI Guangfan, et al. Damping control method of subsynchronous oscillation for direct drive wind turbine generator and its adaptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 177-184.
- [9] 杨京, 王彤, 毕经天, 等. 含直驱风电机组的电力系统次同步振荡鲁棒阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 56-65. YANG Jing, WANG Tong, BI Jingtian, et al. Robust damping control of subsynchronous oscillation in power system with direct-drive wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 56-65.
- [10] 张冲, 王伟胜, 何国庆, 等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067. ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.
- [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] 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.
- [13] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 7185-7200. JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 7185-7200.
- [14] 曹建春, 项祖涛, 燕翠, 等. 抑制双馈风电场次同步谐振的STATCOM研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 895-902. CAO Jianchun, XIANG Zutao, YAN Hui, et al. Research on mitigating DFIG wind farm SSR with STATCOM[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 895-902.
- [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] 孙焜, 姚伟, 文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6520-6533. SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6533.
- [17] LIU W, XIE X R, ZHANG X, et al. Frequency-coupling admittance modeling of converter-based wind turbine generators and the control-hardware-in-the-loop validation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 425-433.
- [18] SHU D W, XIE X R, RAO H, et al. Sub- and super-synchronous interactions between STATCOMs and weak AC/DC transmissions with series compensations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(9): 7424-7437.
- [19] 张旭, 谢小荣, 刘辉, 等. 网侧次同步阻尼控制器的设计及其RTDS测试[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6503-6511. ZHANG Xu, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Design and RTDS test of the grid-side sub-synchronous damping controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6503-6511.
- [20] CESPEDES M, SUN J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions

on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.

[21] 苏田宇. 含并网风电场电力系统次同步振荡阻尼控制研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.

SU Tianyu. Research on subsynchronous oscillation damping control in the power system connected with wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

#### 作者简介:

李浩志(1998—),男,四川广元人,博士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析与控制(E-mail: lihz19@mails.tsinghua.edu.cn);

李景一(1990—),男,辽宁丹东人,高级工程师,博士,主



李浩志

要研究方向为海上风电交/直流送出系统的谐振特性分析(E-mail: li\_jy3@hdec.com);  
杨建军(1964—),男,浙江台州人,教授级高级工程师,主要研究方向为水电和新能源工程电气系统设计(E-mail: yang\_jj@hdec.com);  
谢小荣(1975—),男,湖南邵阳人,教授,博士,通信作者,研究方向为可再生能源电力系统、次同步振荡分析与控制及柔性输配电系统(E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

## Shunt-VSC subsynchronous damping controller to suppress SSO in wind power connected by flexible DC sending system

LI Haozhi<sup>1</sup>, LI Jingyi<sup>1,2</sup>, YANG Jianjun<sup>2</sup>, XIE Xiaorong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Far-shore Wind Power Technology of Zhejiang Province,

Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 311112, China)

**Abstract:** Wind power connected to AC grid by flexible DC transmission (here is called flexible DC) system has become one of the main ways for grid connected onshore/offshore wind power system. However, there is a risk of subsynchronous oscillation caused by control interaction between wind power and flexible DC system. In order to suppress the oscillation, a shunt-VSC (Voltage-Source Converter) subsynchronous damping controller independent of flexible DC system and wind turbine unit converter is proposed. The collection line voltage is used as the input signal by this controller and the oscillation modes of the signal are extracted to modulate the signal's amplitude and phase, moreover the subsynchronous frequency current is injected by shunt-VSC into the system to suppress the oscillation. The parameters of controller are optimized based on the complex impedance method. The simulative results demonstrate that the proposed controller can suppress the oscillation effectively under different operation conditions.

**Key words:** wind farm; flexible DC transmission; modular multilevel converter; impedance analysis; suppression of subsynchronous oscillation