

# 基于阻尼控制器下永磁同步电动机SSI的抑制研究

王立达, 韩成浩

(吉林建筑大学电气与计算机学院, 吉林 长春 130118)

**摘要:** 变速风力发电机 (WTG) 包括双馈感应发电机 (DFIG) 和直接驱动永磁同步发电机 (PMSG), 由于其优良的控制特性而得到广泛的应用。在风机与电力系统进行并网时, 风机中的 PMSG 捕捉到了次同步频率下的持续功率振荡, 在这种情况下, PMSG 的控制器将很快饱和, 导致系统中持续的功率振荡。如果与附近任何涡轮发电机的扭转模式相匹配, 则会激发严重的扭转振动。根据发电机的模型进行特征分析和仿真。最后在电源传感器的控制器上附加了一个补充同步阻尼控制回路以重塑阻抗, 从而稳定次同步相互作用下的振荡频率。

**关键词:** 风力发电; 永磁同步发电机; 次同步谐振; 同步阻尼控制; 仿真

## Research on SSI suppression of permanent magnet synchronous motor based on damping controller

WANG Lida, HAN Chenghao

(Jilin Architectural University School of Electrical and Computer Science, Changchun 130118, China)

**Abstract:** Variable speed wind turbine (WTG), including doubly fed induction generator (DFIG) and direct drive permanent magnet synchronous generator (PMSG), has been widely used due to its excellent control characteristics. When the wind turbine is connected to the power system, the permanent magnet synchronous generator (PMSG) in the wind turbine is caught in the continuous power oscillation at the subsynchronous frequency. In this case, the PMSG controller will soon saturate, leading to the continuous power oscillation in the system. If unfortunately it matches the torsional mode of any nearby turbine generator, severe torsional vibration will be excited. According to the model of generator, characteristic analysis and MATLAB/Simulink simulation are carried out. Finally, a supplementary synchronous damping control loop is added to the controller of the power sensor to reshape the impedance and stabilize the oscillation frequency under the subsynchronous interaction.

**Key words:** wind power generation; permanent magnet synchronous generator; subsynchronous interaction; synchronous damping control; simulation

## 0 引言

风力发电系统与电网并网时会产生次同步相

互作用的低频率振荡<sup>[1]</sup>, 目前抑制低频率振荡的普遍方案是增加系统正阻尼或优化控制减少负阻尼的

产生<sup>[2]</sup>。由于双馈感应发电机的控制与固定串联补偿之间的相互作用,导致大量变速风力发电电路损坏。这种类型的次同步振荡称为次同步控制相互作用或次同步相互作用,因为变速风力发电机参与了不稳定的次同步功率振荡的形成。

关于交流网络与一般电压源转换器<sup>[3]</sup>相互作用的研究有很多,与调节转换器接口的恒定功率负荷具有负阻抗特性,将导致系统不稳定。相邻转换器的锁相环(PLL)之间的耦合可以使系统更容易受到振荡的影响。然而,由上述负阻抗、PLL耦合或谐振电路所引起的不稳定性主要是针对高频振荡。电力系统已多次捕捉到次同步频率的持续功率振荡<sup>[4]</sup>。这些振荡起源于直接驱动永磁同步发电机的风电场,并广泛扩展到外部电网。振荡功率的振幅有时甚至超过基本功率的振幅。在严重的事件中,这种振荡甚至在附近的涡轮发电机中引起强烈的扭转振动,导致电厂中的所有发电机因其扭转保护系统跳闸。现阶段用于风电系统次同步振荡问题的分析方法有频率扫描法、特征值分析法。本文介绍一种加装次同步阻尼控制器(SSDC)的控制方案来抑制低频率振荡<sup>[5]</sup>,并且通过仿真模型的分析验证加装SSDC的效果;证明SSDC是一种很好的抑制次同步相互作用低频率振荡的方法。

## 1 交流电网风电场的次同步相互作用特性

### 1.1 风力发电侧的系统参数

风力发电系统连接到交流电网的模型如图1所示。

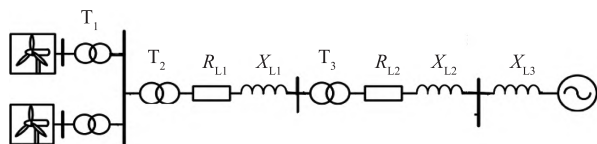


图1 风力发电系统连接到交流电网的模型

Fig. 1 Model of wind power generation system connected to AC power grid

风电场有 $m$ 个相同的变速风力发电机。它们具有相同的容量、结构参数和运行状态,并连接到电网。考虑到风电场通常采用同类型的变速风

力发电机,并且所有发电机都在相似的环境下运行,用升压变压器 $T_2$ 和阻抗 $R_{L1}$ 、 $jX_{L1}$ 的110 kV线路表示本地传输,通过升压变压器 $T_3$ 将本地110 kV电网连接到阻抗为 $R_{L2}$ 、 $jX_{L2}$ 长距离220 kV线路。

线路和变压器参数见表1。

表1 线路和变压器参数

Tab. 1 Line and transformer parameters

| 参数       | 幅值   | 参数       | 幅值   |
|----------|------|----------|------|
| $R_{L1}$ | 0.04 | $R_{L2}$ | 0.15 |
| $X_{L1}$ | 0.15 | $X_{L2}$ | 0.63 |
| $X_{L3}$ | 0.04 | $X_{T1}$ | 0.06 |
| $X_{T2}$ | 0.12 | $X_{T3}$ | 0.17 |

直驱式PMSG的并网主要取决于系统的控制特性,电网侧转换器(GSC)的控制如图2所示,GSC控制器采用 $dq$ 参考系中的矢量控制策略,符号和参数见表2。有直流电压和无功功率的外环控制,以及 $d$ 轴和 $q$ 轴电流的内环控制。在这些控制回路中使用了比例积分(PI)控制器。

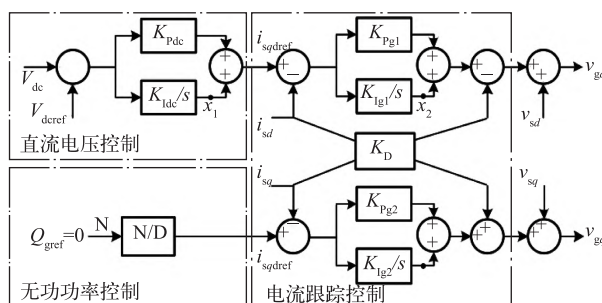


图2 网侧转换器的控制图

Fig. 2 Control diagram of grid side converter

表2 网侧转换器的控制块中的符号

Tab. 2 Symbols in the control block of the grid side converter

| 符号                        | 含义                      |
|---------------------------|-------------------------|
| $i_{sd} i_{sq}$           | GSC 输出电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量 |
| $V_{sd} V_{sq}$           | GSC 输出电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量 |
| $I_{sdref} i_{sqref}$     | $i_{sd} i_{sq}$ 的参考值    |
| $V_{gd} V_{gq}$           | $V_{sd} V_{sq}$ 的参考值    |
| $V_{dc} V_{dcref}$        | 直流电压及其参考值               |
| $Q_{gref}$                | GSC 输出无功功率的参考值          |
| $K_{pdc}/K_{pg1}/K_{pg2}$ | 比例增益                    |
| $K_{dc}/K_{ig1}/K_{ig2}$  | 积分增益                    |
| $K_D$                     | 解耦增益                    |

典型的1.5 MW直接驱动PMSG的配置如图3所示,由部署在上述风电场的WTG的制造商提供。包括1个风力涡轮机、1个PMSG、1个机器侧转换器(1个二极管整流器和1个增压直流/直流转换器)、1个直流链路、1个网格侧转换器(GSC、1个PWM VSC)和1个LC滤波器。

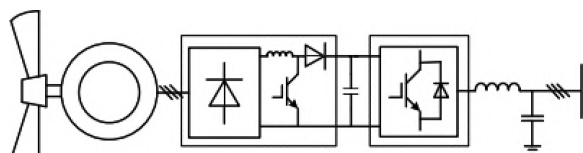


图3 1.5 MW 直接驱动永磁同步发电机模型

Fig. 3 Model of 1.5 MW direct drive permanent magnet synchronous generator

## 1.2 系统等效建模

基于PMSG的风力转换系统与交流电网之间的特性,评估发电机的SSI特性。

特征分析在一定的工作条件下,在 $dq$ 参考系中推导出的状态方程为

$$\begin{cases} \Delta X = A\Delta X + B\Delta U \\ \Delta Y = C\Delta X + D\Delta U \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta X$ 、 $\Delta Y$ 、 $\Delta U$ 分别为增量状态变量、输出量和控制向量; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 为具有适当维数的系数矩阵。

本文通过收集总线的短路容量除以整个风电厂的安装容量获得SCR。

假设风电场中均为容量为1.5 MW的风力机。200台发电机在使用,输出功率为10%,而涡轮发电机关闭。忽略风电场内部电缆,假设所有风力机都接于同一母线,并且运行状态都相同。在这种情况下,通过将采集总线的短路容量除以整个风电场的装机容量获得次同步振荡功率。

$$SCR = \frac{S_B X_\Sigma}{NS_{PMSG}} \approx 1.364 \quad S_{PMSG} = 1.5 \text{ MW} \quad (2)$$

$$X_\Sigma = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + X_{T2} + X_{T3}$$

值得注意的是,在这种情况下下的次同步振荡功率非常低,意味着风电场连接到一个非常弱的交流电网。电压源转换器和交流电网密切相关的振荡特征值见表3。显然,存在一对共轭特征值

( $\lambda_{7,8}$ ),其频率位于次同步范围内,这正是应注意的次同步相互作用模式。此外,特征值的实部为正数,说明风转换系统与交流电网之间的次同步相互作用是不稳定的。

表3 与电压源转换器和交流电网相关的振荡特征值

Tab. 3 Oscillation characteristic values related to voltage source converters and AC grids

| 模式              | 特征值                 | 振荡频率 | 阻尼比   |
|-----------------|---------------------|------|-------|
| $\lambda_{1,2}$ | $-42.92 \pm j24.34$ | 3.79 | 0.13  |
| $\lambda_{3,4}$ | $-34.93 \pm j19.85$ | 6.11 | 0.52  |
| $\lambda_{5,6}$ | $-45.15 \pm j18.71$ | 0.3  | 1.1   |
| $\lambda_{7,8}$ | $3.56 \pm j30.76$   | 73.2 | 1.362 |

对于次同步相互作用(SSI)模式,计算了状态变量的参与因数,见表4。有一些高度相关的变量,例如电网侧转换器(GSC)控制器中的状态变量(即 $x_1$ 和 $x_2$ )、线路电流的 $d$ 轴分量和直流链路的电压。

特征分析表明:如果多个变速风力发电机连接到交流电网,它们的相互作用可能导致欠阻尼甚至不稳定的次同步相互作用。

表4 状态变量的参与因数

Tab. 4 Participation factors of state variables

| 状态变量                | 参与因数    |
|---------------------|---------|
| GSC 控制器中的状态变量 $x_1$ | 0.205 4 |
| GSC 控制器中的状态变量 $x_2$ | 0.457 3 |
| GSC 控制器中的状态变量 $x_3$ | 0.047 6 |
| 滤波器输入电流的 $d$ 轴分量    | 0.084 6 |
| 滤波器输入电流的 $q$ 轴分量    | 0.004 5 |
| 滤波器电容器电压的 $d$ 轴分量   | 0.008 0 |
| 滤波器电容器电压的 $q$ 轴分量   | 0.004 3 |
| 线路电流的 $d$ 轴分量       | 0.394 5 |
| 线路电流的 $q$ 轴分量       | 0.025 8 |
| 直流链路的电容器电压          | 0.409 2 |

## 2 产生次同步相互作用的低频振荡原因

### (1) 输电线路电抗的影响

SSI模式对应的特征值随总电抗变化而变化,如图4所示。总电抗增加,有较低的短路比SCR,特征值的实部从负变为正。当交流电网变弱时,次同步相互作用变得不稳定。此外,电抗强度的增加导致振荡频率降低。

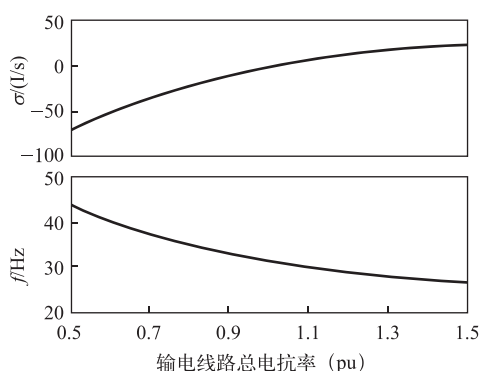


图4 SSI模式随输电线路总电抗率的变化而变化

Fig. 4 Changes in SSI mode as a function of the total reactance rate of the transmission line

## (2) 在线变速风力发电机数量的影响

在线变速风力发电机的数量直接影响短路比, 从而对次同步相互作用的特征有重要影响。图5显示了它们之间的关系。可以看出, 次同步相互作用的阻尼和频率与变速风力发电机的数量呈负相关。变速风力发电机使用得越多, 次同步相互作用就越不稳定, 频率就越低。

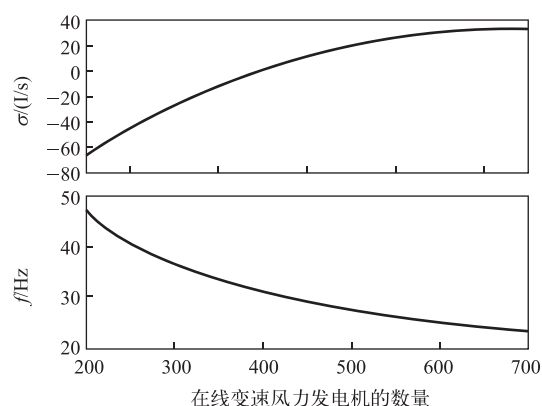


图5 SSI模式随在线变速风力发电机的数量变化而变化

Fig. 5 SSI mode changes with the number of online variable speed wind turbines

## (3) 电压源转换器GSC控制器参数的影响

GSC控制器有3个PI控制器, 总共有1个循环和6个控制参数。当这些控制参数在其预设值的0.1~2倍之间变化时, 次同步相互作用相关特征值的变化如图6所示。显然, 所有这些参数对次同步相互作用模式都有很大的影响。

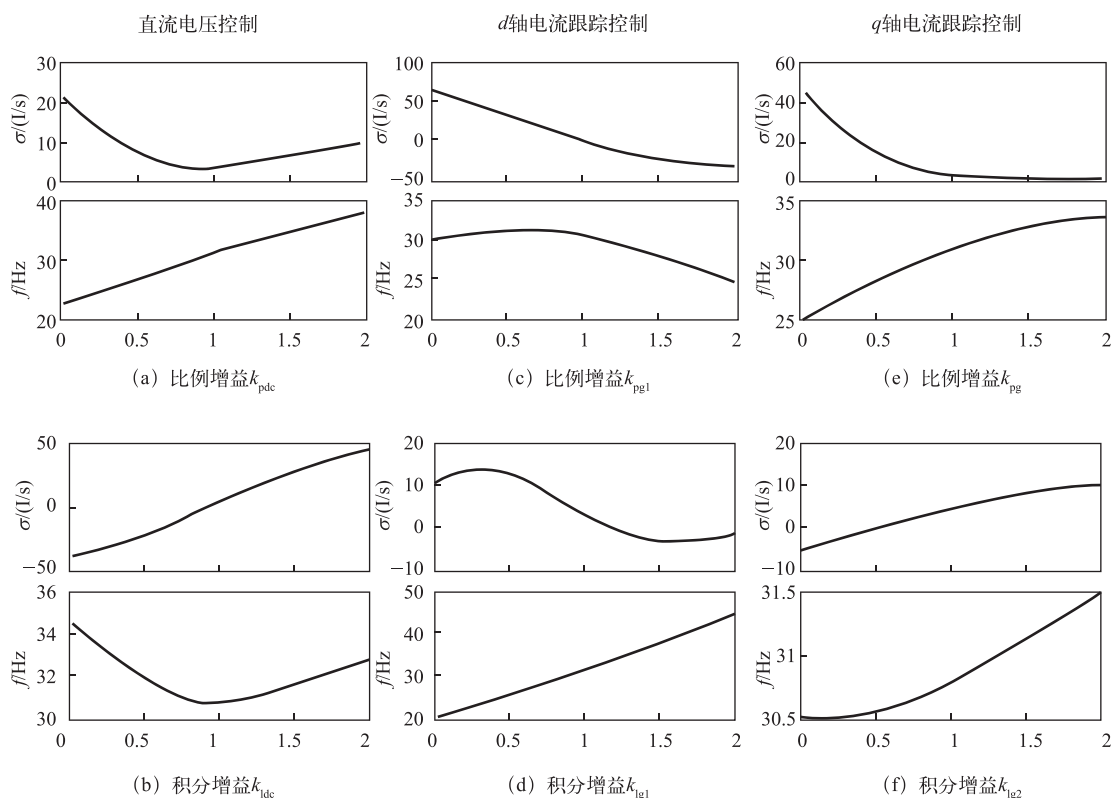


图6 SSI模式随GSC控制器参数变化而变化

Fig. 6 SSI mode changes with GSC controller parameters

### 3 时域仿真

利用PSCAD/EMTDC软件进行时域仿真<sup>[7-8]</sup>，分析了SSI的特性。结果为：只有220 kV线的电抗 $X_L$ ，最初设置为0.4 (pu)。在2 s时，它突然上升到0.65 (pu)，这使得交流电网更弱，模拟持续5 s。图7显示了A相电流、有功功率和d轴电流参考曲线。直接驱动PMSG在0~5 s内的动态特性如图8所示。所有观察到的信号在线电抗的阶跃上升后立即发散；有一个不稳定的SSI。当电流达到其上限时，出现了持续的振荡；在这个阶段电流严重扭曲，有源功率包含大量的次同步谐波。

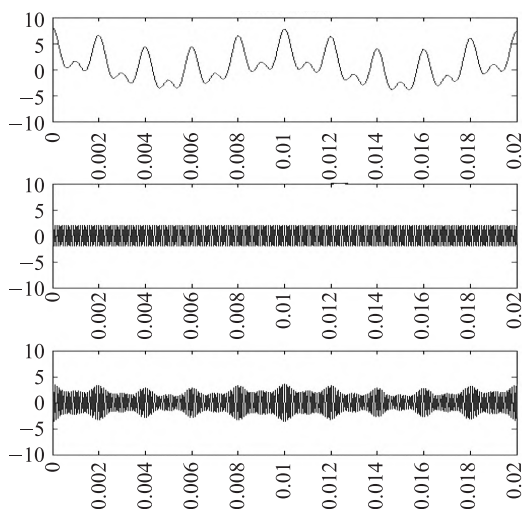


图7 直接驱动PMSG的动态

Fig. 7 Dynamics of directly driving PMSG

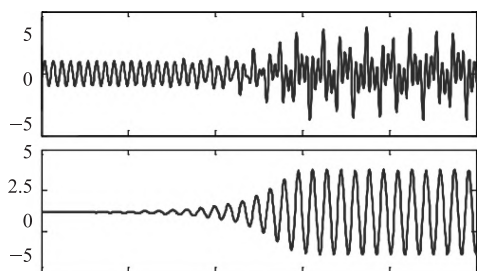


图8 直接驱动PMSG在0~5 s内的动态特性

Fig. 8 Dynamic characteristics of direct drive PMSG within 0 ~ 5 seconds

对输出电流和有源功率进行基于离散傅里叶变换 (DFT) 的频谱分析。测试结果如图9所示。电流具有明显的次同步 (14.264 Hz) 和超

同步 (59.76 Hz) 频率。它们的振幅甚至可以与基本振幅相当。相应地，有源功率包含一个具有互补频率的次谐波频率 (22.76 Hz)。

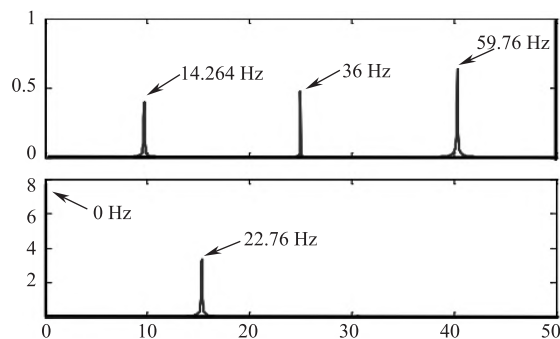


图9 DFT分析结果

Fig. 9 DFT analysis results

最初有200个风力发电机在工作。在接下来的每个时刻 $t=10$  s、20 s和30 s时，系统中又增加了100个风力发电机。图10a显示了一个WTG的有功功率。值得注意的是，当200台风力发电机在线时，系统运行稳定。一旦另外100台风力发电机在10 s内同步，就会出现不稳定的SSI。当更多的风力发电机集成到电网中时，次同步功率振荡以更高的振幅持续。分析结果与特征值分析的结果一致。

有功功率的频率变化如图10b所示。随着在线风力发电机数量的增加，SSI的频率降低。这种情况也与特征值分析的结果很吻合。

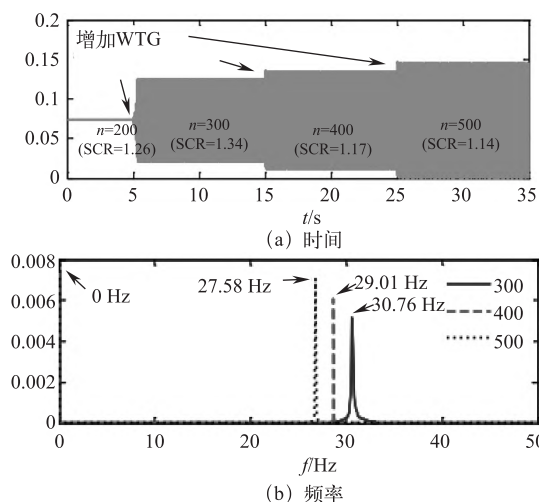


图10 SSI特性/有功功率随在线WTG的数量而变化

Fig. 10 Changes in SSI characteristics/active power with the number of online WTGs

## 4 次同步相互作用问题的解决方法

为了解决这种新型的SSI问题，提出了一种基于补充次同步阻尼控制<sup>[9]</sup>（SSDC）的简单而有效的缓解方案，如图11所示。SSDC连接到一个PMSG的GSC控制器上，由高通滤波器、增益器和移相器组成。采用高通滤波器选择有关的次同步信号，避免干扰GSC的正常控制功能<sup>[10-11]</sup>。增益和移相器灵活地调整信号的幅度和相位，获得更好的控制性能。局部可用的变量，如GSC输出电流 $i_{sd}$ 的d轴分量和直流电压 $v_{dc}$ 可以作为反馈，因为它们对SSI模式有更大的影响。将SSDC的控制信号或 $\Delta v_{ssi}$ 添加到GSC输出电压 $v_{gd}$ 的d轴分量上。

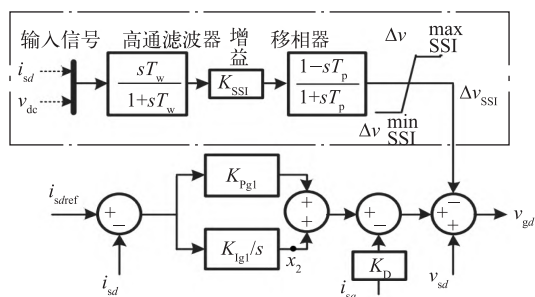


图 11 GSC 控制器中的 SSDC 方案

Fig. 11 SSDC scheme in GSC controller

SSDC经过仔细调整，其减轻SSI的能力被阻抗分析和非线性模拟验证。当SSDC连接到GSC控制器上时，其中图例为带有SSDC的SCR=1.17。显然，SSDC大大增加 $Z_{pdd}$ 的阻抗性，对 $Z_{pdq}$ 、 $Z_{pqd}$ 和 $Z_{pqq}$ 的影响很小。为了检验SSDC对整个系统同步特性的影响，当SCR为1.17时，阻抗-频率曲线如图12所示。没有SSDC时，过零频率为29.01 Hz，其中电阻为负值，表示一个不稳定的SSI。如果SSDC投入运行，过零频率降低到25.13 Hz。在这一点上电阻足够正，意味着SSI具有很好的稳定性<sup>[12-13]</sup>。因此，证明了SSDC增加电阻或阻尼的能力。

通过仿真验证SSDC方案的有效性。在没有SSDC的情况下，当300、400或500台风力发电机在线时，会发生持续的功率振荡。当SSDC打开时，振荡迅速衰减，如图13所示。这些结果证

明了SSDC可以有效地稳定SSI，不影响PMSG的正常操作。

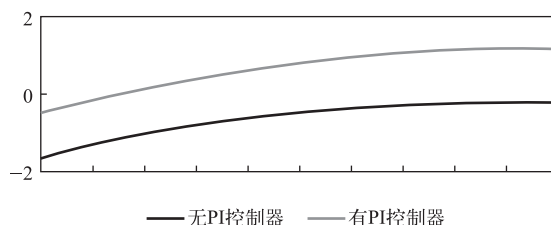


图 12 有 / 无 SSDC (SCR=1.17) 的阻抗频率曲线

Fig. 12 Impedance frequency curve with/without SSDC (SCR=1.17)

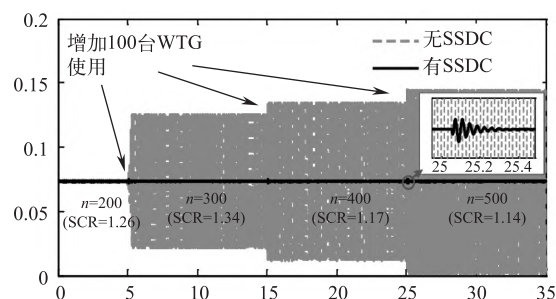


图 13 通过时域仿真验证了加装同步阻尼控制器方案

Fig. 13 Verifies the scheme of installing a synchronous damping controller through time-domain simulation

## 5 结束语

基于多个直接驱动永磁同步发电机的风电场与弱交流网络之间的相互作用导致欠阻尼的SSI模式。在非常小的短路比（SCR）情况下，SSI变得不稳定，导致风力发电机（WTG）以及相关的电网出现持续的次同步功率振荡；SSI的频率和稳定性取决于许多因素，主要因素包括短路比（由电网强度和WTG的在线容量决定）、WTG转换器的控制策略和参数。直接驱动电源与弱交流电网相互作用在SSI频率下产生的负电阻效应是造成功率振荡的主要原因。辅助的次同步阻尼控制回路附加到PMSG的控制器上，控制不稳定的SSI。对SSI进行分析验证得到最终的结果。

### 参考文献

- [1] 郑新宇, 孙士云, 张雪娟, 等. 直驱风电场并网

- 对系统静态电压稳定性的影响[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 25-34.
- [2] 朱鑫要, 金梦, 李建生, 等. 统一潮流控制器附加阻尼抑制次同步谐振的理论与仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 44-49.
- [3] 王旭斌, 杜文娟, 王海风. 弱连接条件下并网 VSC 系统稳定性分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1593-1604, 1895.
- [4] 郑新宇, 孙士云, 张雪娟, 等. 直驱风电场并网对系统静态电压稳定性的影响[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 25-34.
- [5] 王玉芝, 王亮, 姜齐荣. 基于 STATCOM 的风电场 SSCI 附加阻尼抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 49-55.
- [6] 刘为杰, 姜建国. 直驱永磁同步风电机组次同步振荡建模分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 97-103.
- [7] 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(22): 7185-7201.
- [8] 胡文波. 电流内环主导的直驱风电场次同步振荡分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.
- [9] 苏田宇, 杜文娟, 王海风. 多直驱永磁同步发电机并联风电场次同步阻尼方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 116-127.
- [10] ZHOU Yingkun, XU Guorui, WEI Siming, et al. Techno-economic analysis of motor-generator pair system and virtual synchronous generator for providing inertia of power system[J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2017, 11(6): 569-573.
- [11] 祝可可, 阮琳. 永磁直驱风力发电机自抗扰技术及其无位置传感器控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 266-274.
- [12] WEI S, ZHOU Y, HUANG Y. Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy[J]. IEEE Access, 2017(5): 11505-11512.
- [13] 胡文波. 电流内环主导的直驱风电场次同步振荡分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2021.

#### 作者简介

王立达 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 电气工程 控制工程。

韩成浩 (1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 人工智能、机器人工程和电气工程。

(收稿日期: 2022-10-11)