

直驱风场经柔直并网的次同步振荡建模与分析

张程^{1,2}, 陈昌亮¹

(1. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

2. 智能电网仿真分析与综合控制福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350118)

摘要: 针对直驱风电场经串补及柔性直流输电引起的次同步振荡问题, 建立了直驱风电场经 VSC-HVDC 的系统仿真模型。利用该模型模拟了次同步振荡现象, 并用频谱分析验证了其正确性。利用时域仿真法, 设置不同的场景分析风机网侧换流器的内环控制参数、串补度以及直流侧电容对直驱风机经柔直输电并网系统的稳定性影响。针对减小次同步振荡危害, 结合实际工程提出建议。

关键词: 直驱风电场; 次同步振荡; 频谱分析; 时域仿真; 特性分析

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)04-0363-07

Modeling and analysis of subsynchronous oscillation in a direct drive wind farm connected to the grid through VSC-HVDC system

ZHANG Cheng^{1,2}, CHEN Changliang¹

(1. School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Engineering Research Center for Simulation Analysis and Integrated Control of Smart Grid in Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A system simulation model for direct drive wind farms through VSC-HVDC was established to address the problem of subsynchronous oscillation caused by series compensation and flexible DC transmission. The subsynchronous oscillation phenomenon was simulated using this model, and its correctness was verified through spectral analysis. By using time-domain simulation method and setting different scenarios, analysis was made on the influence of the inner loop control parameters, series compensation degree, and DC side capacitance of the wind turbine grid side converter on the stability of the direct drive wind turbine grid connected system through flexible direct transmission. Suggestions are put forward to reduce the harm of subsynchronous oscillation based on practical engineering.

Keywords: direct drive wind farm; subsynchronous oscillation; spectrum analysis; time-domain simulation; characteristic analysis

至 2023 年 3 月底, 中国累计风电装机容量约为 3.8 亿 kW^[1], 未来其发展规模还将不断增大。伴随风电规模的发展, 其所面临的问题和挑战也不断增多, 特别是新能源与主网并网产生次同步振荡 (subsynchronous oscillation, SSO)^[2] 的风险日益增大。近年来, 国内外关于次同步振荡事故的记录与研究分析也持续增多。如 2009 年美国德州电网因

为风电系统控制模块与串补线路之间交互作用导致的次同步控制相互作用 (subsynchronous control interactions, SSCI) 而发生的次同步振荡事故^[3]。2012 年以来, 张北沽源风电场在并网运行时发生过多次数次同步振荡现象^[4], 导致大范围的风机脱网。2015 年, 新疆地区风机并网时由于电网的弱链接^[5]产生多次持续次同步振荡, 导致距离风电

收稿日期: 2023-05-22

基金项目: 福建省财政厅专项 (GY-220230); 福建省自然科学基金 (2023J01951)

第一作者简介: 张程 (1982—), 男, 山西临汾人, 副教授, 博士, 研究方向: 电力系统稳定性分析、广域监测。

场 300 km 外的多台火电机组切机事故。

目前,国内外对风电并网产生次同步振荡现象已有一定程度研究。文献[6]对直驱变流器接入弱电网后的次同步振荡机理进行了详细的分析,研究表明逆变器 q 轴电流环或锁相环的比例较小时,电阻呈负电阻特征。文献[7]对直驱风机接入弱交流系统产生次同步振荡的机理进行分析,研究结果表明在振荡频率上风机部分表现为“小电阻,负容性”。文献[8]对由直驱风电场和 VSC-HVDC 共同参与产生的次同步振荡特性进行分析,得出了聚合风场及 VSC-HVDC 特性对系统稳定性的影响。文献[9]分析了直驱风机在全运行区域下产生的次同步振荡特性。文献[10]采用阻抗法分析了网架强度、风速等对次同步振荡特性的影响。文献[11]以实际工程案例为原型在仿真软件上进行等值模拟次同步振荡现象,并讨论了次同步振荡的影响因素。

本课题以直驱风电场经串补线路通过柔性直流输电 (voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)^[8] 并网系统作为研究对象,对直驱风电并网系统进行了数学模型的推导和仿真模型的建立,利用算例分析次同步振荡的影响因素,结合仿真结果分析网侧换流器控制模块中内环控制 PI 参数 K_{pgd} 、 K_{igd} 、 K_{pgq} 、 K_{igq} 和串补度 K_c 及直流侧电容 C_{dc} 对次同步振荡特性的影响。

1 直驱风场经柔直并网系统数学模型

本课题采用永磁同步发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG), 风机主要包括风机轴系、直驱同步发电机、换流器及锁相环控制模块,输电线路包括交流输电部分与柔直输电部分。

1.1 数学模型

1.1.1 轴系

PMSG 发电机轴系用的是单质量块模型^[12], 其轴系动态方程如式(1)所示:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_M - T_e \quad (1)$$

式中, J 为风机总转动惯量; ω 、 T_M 、 T_e 分别表示风机的转速、机械转矩以及电磁转矩。

1.1.2 发电机

规定永磁发电机中的同步旋转坐标系 d 轴与永磁体产生的磁场同相位,从而得到如下 d - q 同

步坐标系下的 PMSG 的动态模型如式(2):

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s L_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s L_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s \psi \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_s 、 R_s 和 ω_s 分别表示定子电感、电阻与发电机侧的电气角速度; u_{sd} 、 i_{sd} 分别表示 d 轴上的定子电压与电流, u_{sq} 、 i_{sq} 分别表示 q 轴上的定子电压与电流; ψ 为定子磁链。

1.1.3 换流器

直驱风机的机侧换流器 (machine-side converter, MSC) 和网侧换流器 (grid-side converter, GSC) 均采用解耦控制,换流器控制框图如图 1 所示。其中, MSC 能够将发电机发出的交流电变为直流电,对发电机输出有功与无功进行解耦控制,并实现最大功率跟踪; GSC 能够控制直流母线电压的稳定,同时实现并网有功功率和无功功率的调整。

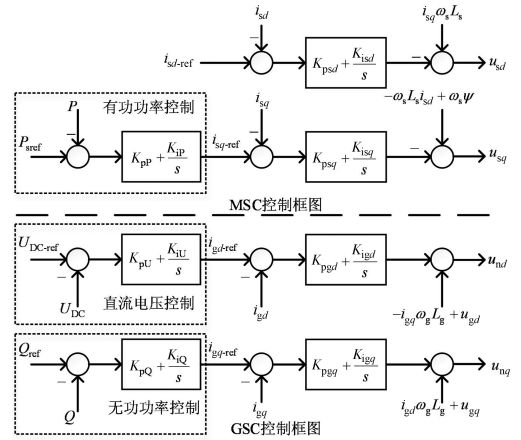


图 1 换流器控制框图

Fig.1 Control block diagram of converter

机侧换流器和网侧换流器的动态方程分别如式(3)(4)所示:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = i_{sd-ref} - i_{sd} \\ \frac{dx_2}{dt} = P_{ref} - P \\ \frac{dx_3}{dt} = i_{sq-ref} - i_{sq} \\ u_{sd} = K_{psd}(i_{sd} - i_{sd-ref}) - K_{isd}x_1 + i_{sq}\omega_s L_s \\ u_{sq} = K_{psq}(P - P_{ref}) - K_{ip}K_{psq}x_2 \\ \quad + K_{psq}i_{sq} - K_{isq}x_3 - \omega_s L_s i_{sd} + \omega_s \psi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases}
\frac{dx_4}{dt} = U_{DC-ref} - U_{DC} \\
\frac{dx_5}{dt} = i_{gd-ref} - i_{gd} \\
\frac{dx_6}{dt} = Q_{ref} - Q \\
\frac{dx_7}{dt} = i_{gq-ref} - i_{gq} \\
u_{nd} = K_{pU} K_{pgd} (U_{DC-ref} - U_{DC}) + K_{iU} K_{pgd} x_4 \\
-i_{gd} K_{pgd} + K_{igd} x_5 - i_{gq} \omega_g L_g + u_{gd} \\
u_{nq} = K_{pQ} K_{pgq} (Q_{ref} - Q) + K_{iQ} K_{pgq} x_6 + i_{gq} K_{pgq} \\
+ K_{igq} x_7 + i_{gd} \omega_g L_g + u_{gq}
\end{cases} \quad (4)$$

式中, $x_{1 \sim 3}$ 、 $x_{4 \sim 7}$ 分别为 MSC 及 GSC 的状态变量; P 、 Q 分别代表风机输出有功、无功功率; u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 分别是 MSC 出口电压及电流的直交轴分量; K_{psd} 、 K_{isd} 为 MSC d 轴电流内环的 PI 参数; K_{pP} 、 K_{iP} 为 MSC 有功外环的 PI 参数; K_{psq} 、 K_{isq} 为 MSC q 轴电流内环的 PI 参数; u_{nd} 、 u_{nq} 、 i_{gd} 、 i_{gq} 为 GSC 出口电压及电流的直交轴分量; u_{gd} 、 u_{gq} 为风机出口电压直交轴分量; K_{pU} 、 K_{iU} 为 GSC 电压外环的 PI 参数; K_{pgd} 、 K_{igd} 为 GSC d 轴电流内环的 PI 参数; K_{pQ} 、 K_{iQ} 为 GSC 无功外环的 PI 参数; K_{pgq} 、 K_{igq} 为 GSC q 轴电流内环的 PI 参数; ω_g 、 L_g 为电网侧角速度及滤波电感。其中, 下标带有 ref 的字符为其对应参数的参考值。

1.1.4 锁相环

锁相环模块是以节点电压 u_g 为基准设定 d - q 旋转坐标系, 并以 q 轴分量作为锁相环的输入。原理图如图 2 所示。

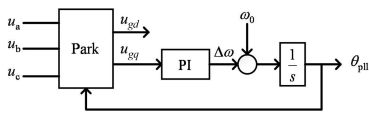


图2 PLL 锁相环结构图

Fig.2 Structure diagram of PLL

对其建立动态模型如式(5)所示。

$$\begin{cases}
\frac{dx_a}{dt} = u_{gq} \\
\frac{d\theta_{pll}}{dt} = \omega_0 + \Delta\omega = \omega_0 + u_{gq} k_{p\theta} + u_{gq} \frac{k_{i\theta}}{s}
\end{cases} \quad (5)$$

其中, u_{gd} 和 u_{gq} 为并网点电压的直交轴分量; $\Delta\omega$ 、 ω_0 分别为角速度偏差和实际角速度; θ_{pll} 为输出相角; $k_{p\theta}$ 、 $k_{i\theta}$ 分别表示为锁相环模块中的比例系数

与积分系数。

1.1.5 交流输电线路

风机出口经升压变压器 T_1 升压后, 经交流输电线路进入 T_2 升压, 最后接入柔直系统。交流输电线路动态方程如式(6)所示。

$$\begin{cases}
\frac{di_{ld}}{dt} - \omega_g i_{lq} = \frac{k}{L_2} u_{gd} - \frac{R_2}{L_2} i_{ld} - \frac{1}{L_2} u_{ld} \\
\frac{di_{lq}}{dt} + \omega_g i_{ld} = \frac{k}{L_2} u_{gq} - \frac{R_2}{L_2} i_{lq} - \frac{1}{L_2} u_{lq} \\
\frac{du_{gd}}{dt} - \omega_g u_{gq} = \frac{1}{k^2 C_1} i_{gd} - \frac{1}{k C_1} i_{ld} \\
\frac{du_{gq}}{dt} + \omega_g u_{gd} = \frac{1}{k^2 C_1} i_{gq} - \frac{1}{k C_1} i_{lq}
\end{cases} \quad (6)$$

式中, i_{ld} 、 i_{lq} 分别为交流线路电流的直交轴分量; k 为变压器变比; u_{ld} 、 u_{lq} 分别为交流线路连接母线电压的直交轴分量。

1.1.6 柔直输电线路

经 T_2 升压变压器后进入柔直输电部分, 柔直输电系统如图 3 所示, 式(7)为其动态方程。

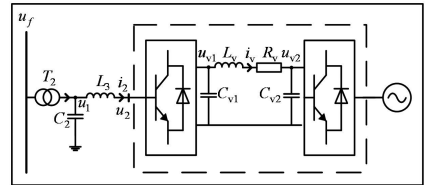


图3 柔性直流系统图

Fig.3 VSC-HVDC system diagram

$$\begin{cases}
L_3 \frac{di_{2d}}{dt} - \omega_g L_3 i_{2q} = u_{1d} - u_{2d} \\
L_3 \frac{di_{2q}}{dt} + \omega_g L_3 i_{2d} = u_{1q} - u_{2q} \\
C_2 \frac{du_{1d}}{dt} - \omega_g C_2 u_{1q} = -i_{2d} - i_{1d} \\
C_2 \frac{du_{1q}}{dt} + \omega_g C_2 u_{1d} = -i_{2q} - i_{1q} \\
L_v \frac{di_v}{dt} + R_v i_v = u_{v1} - u_{v2} \\
C_{v1} \frac{du_{v1}}{dt} + i_v u_{v1} = u_{2d} i_{2d} + u_{2q} i_{2q}
\end{cases} \quad (7)$$

式中, L_3 、 C_2 分别为交流侧线路电感及滤波电容; i_{ld} 、 i_{lq} 分别为变压器输出电流直、交轴分量; u_{ld} 、 u_{lq} 分别为变压器输出电流直、交轴分量; i_{2d} 、 i_{2q} 分别为交流线路电流直、交轴分量; u_{2d} 、 u_{2q} 分别为直

流侧入口电压直、交轴分量; i_v 是直流侧电流; L_v 、 R_v 、 C_v 分别为直流侧电感、电阻、电容。以上均为柔直系统内参数。

1.2 结构模型

本课题所研究的直驱风电场经柔性直流输电

并网系统结构如图 4 所示,并基于此图在 PSCAD/EMTDC 平台建立整体模型。所建风电系统采用永磁直驱同步发电机的等值模型来表示模拟风电场,总装机容量为 100 WM。

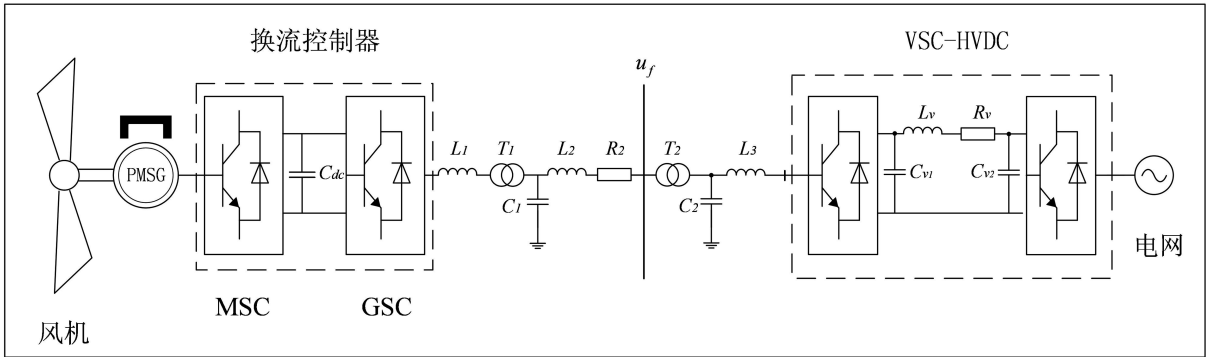


图 4 PMSG 风电系统经 VSC-HVDC 结构图

Fig.4 Structure diagram of PMSG wind power system via VSC-HVDC

系统整体结构如下:起始端为直驱风电场,其中风力机与永磁直驱同步发电机相连,将风能转化为电能后经过换流器传送到升压变压器 T_1 ,电压升至 35 kV 后经过交流输电线路送至升压变压器 T_2 ,最后通过柔性直流输电系统并入交流电网。图中 C_{dc} 为风电机组换流器的直流侧电容, L_1 为网侧换流器滤波电感, C_1 、 L_2 、 R_2 分别为交流输电线路的等值电容、电感、电阻, C_2 为柔直系统交流侧的滤波电容, L_3 为柔直系统的相电抗器, L_v 、 R_v 、 C_v 为柔直系统直流侧电感、电阻和电容。柔直输电系统并网端换流站采用定直流电压控制,能够维持整个直流系统的电压稳定。

2 直驱风场经柔直并网次同步振荡特性与影响因素分析

2.1 振荡特性分析

利用所建立的模型先完成次同步振荡现象的调试,再基于所建模型讨论网侧换流器内环控制参数、换流器直流侧电容值对次同步振荡的影响。模型参数设置如表 1 所示,初始串联电容补偿度为 0%。

运行模型,待系统稳定运行后,4 s 时在交流输电线路投入 40% 串补度的串联补偿电容,随后出现系统振荡现象。线路 A 相电流和瞬时有功功率的动态波形图如图 5 所示。可见,接入串补后 A 相电流波形出现明显畸变,且有功功率呈发散型振荡模式,其中包含次同步频率分量。

表 1 风电并网系统参数

Tab.1 Parameters of wind power grid connection system

风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	叶片长度/m	空气密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	额定功率/MW
11	61	1.225	100
额定电压/kV		直流电容/ μF	GSC 内环参数
0.69		20 000	$K_{pgq} = 2 \quad K_{igd} = 0.2$ $K_{pgq} = 2 \quad K_{igq} = 0.2$

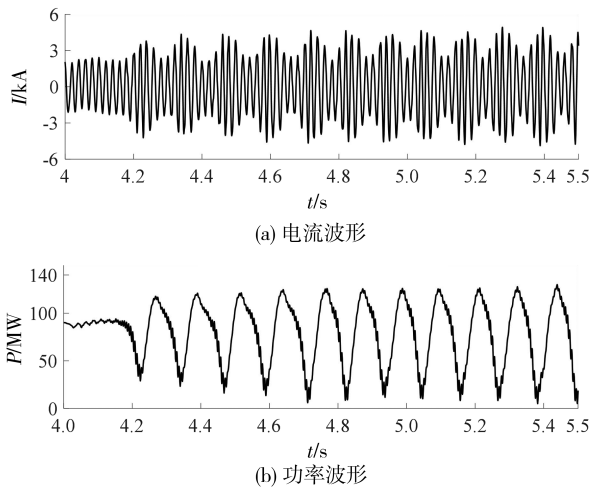


图 5 风场动态电流与有功功率波形图

Fig.5 Wind farm dynamic current and active power waveform

进一步对线路 A 相电流和有功功率进行频

谱分析,图 6 为对应的频谱分析结果。由图 5(a)可知 A 相电流包含 32.2 Hz 和 41.1 Hz 的次同步分量,与图 5(b)所示 17.8 Hz 和 8.9 Hz 的有功功率次同步分量互补。因此,此时系统存在两个次同步振荡模式。

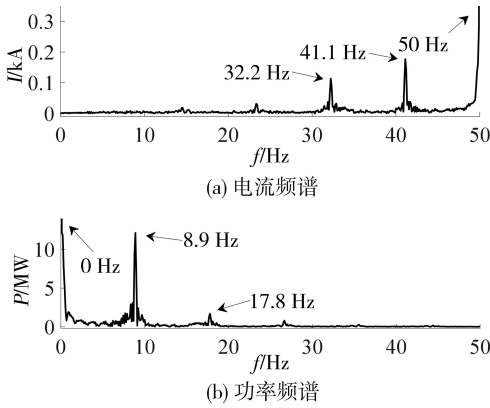


图 6 投入串补后风场电流与有功功率频谱图

Fig.6 Spectrum diagram of wind farm current and active power after input of series compensation

2.2 网侧换流器内环控制参数的影响

在 GSC 和 MSC 的控制参数中,GSC 内环电流跟踪控制的 PI 参数是影响次同步振荡的重要参数。故本课题重点分析内环 4 个控制参数对次同步振荡状态下系统稳定性的影响。其中,网侧变流器的内环——电流跟踪控制环节共有 4 个参数,其控制框图如图 7 所示。

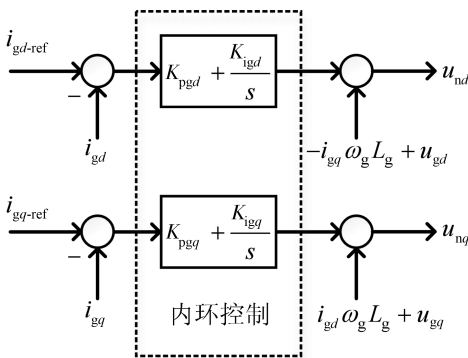


图 7 网侧换流器内环控制框图

Fig.7 Internal loop control block diagram of grid side converter

图 8(a)表示 GSC 电流内环 d 轴 PI 比例系数 K_{pgd} 对次同步振荡时功率波形的影响。由图可知, K_{pgd} 在 0.2 到 0.5 之间时,功率振荡的幅值随着参数的增大不断减小,此时 K_{pgd} 对 SSO 起到抑制作用; K_{pgd} 在 0.5 到 2.0 之间时,功率振荡的幅

值随着参数的增大不断增大,此时 K_{pgd} 对 SSO 起到发散作用。因此,在 0.2 到 2.0 区间内, K_{pgd} 取 0.5 时能使 SSO 的危害尽可能减小。图 8(b)表示 GSC 电流内环 d 轴 PI 积分系数 K_{igd} 对次同步振荡时功率波形的影响。由于 K_{igd} 取值大于 5.0 时,实验结果变化不明显,故取值范围为 0.2 ~ 5.0。由图 8(b)可知,功率振荡的振幅随着 K_{igd} 的增大有所减小,此时 K_{igd} 对 SSO 起到抑制作用。综上,取得合适的 K_{pgd} 值以及适当增大 K_{igd} 的取值有利于降低次同步振荡的风险。

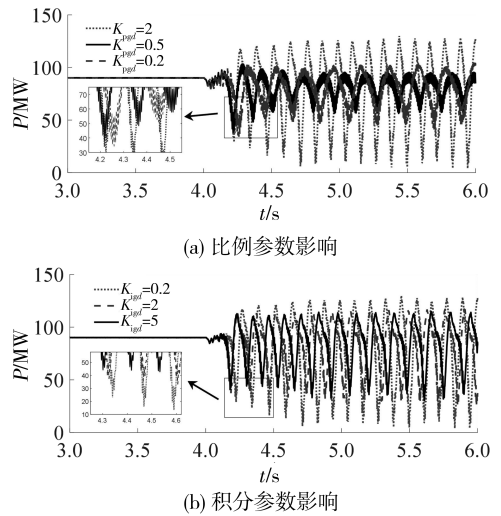


图 8 电流内环 d 轴控制参数对功率振荡波形的影响

Fig.8 Influence of d -axis control parameters of current inner loop on power oscillation waveform

图 9(a)表示 GSC 电流内环 q 轴 PI 比例系数 K_{pgq} 对次同步振荡时功率波形的影响。由图可知,随着 K_{pgq} 的减小,功率振荡的幅值也有所减小,对 SSO 起到轻微抑制作用,当 K_{pgq} 取小于 1.3 时,各电压电流指标在投入串补前就出现不同程度的振荡,此时系统失稳,所以,1.3 为抑制 SSO 和系统失稳时 K_{pgq} 的临界值。图 9(b)表示 GSC 电流内环 q 轴 PI 积分系数 K_{igq} 对次同步振荡时功率波形的影响。由图 9 可知,随着 K_{igq} 的增大,功率振荡的幅值有些许减小,此时对 SSO 起到轻微抑制作用,由于取值大于 50.0 对振荡波形的影响非常小,所以为了减小 SSO 对系统的危害, K_{igq} 取 50.0 最为合适。

综上,为减小 SSO 风险,模型中网侧换流器内环控制参数 K_{pgd} 、 K_{igd} 、 K_{pgq} 和 K_{igq} 取值分别为 0.5、5.0、1.3 和 50.0。

对比调参之前,当内环 4 组 PI 同时取得适

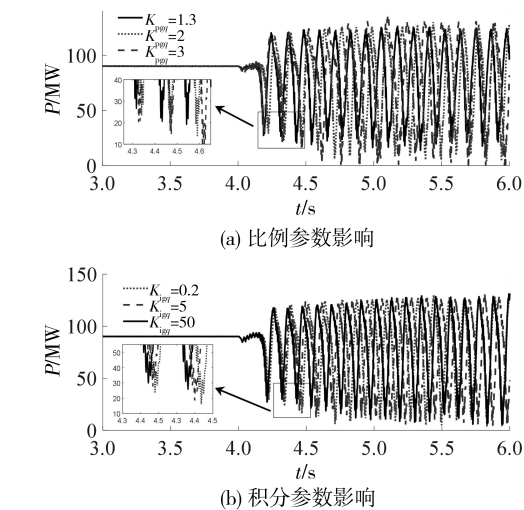


图 9 电流内环 q 轴控制参数对功率振荡波形的影响
Fig.9 Influence of q -axis control parameters of current inner loop on power oscillation waveform

当参数时,风场有功功率的振荡波形振幅明显缩小,对 SSO 的抑制效果最为明显,如图 10 所示。

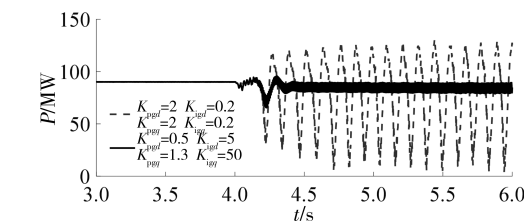


图 10 调节参数后的功率波形对比图
Fig.10 Comparison of power waveforms after adjusting parameters

对此时的功率与电流进行频谱分析,得出结果如图 11 所示,可见调整参数后的频谱图未出现明显的 SSO 分量。

因此,在系统运行前调整适当的网侧换流器 PI 控制参数能够减小次同步振荡带来的危害。但由图 10 和图 11 明显可知,在 4.5 s 后有功功率依旧存在小程度的等幅振荡,所以虽然调整内环 PI 参数能够在一定程度上抑制 SSO,但是调节参数所带来的抑制效果是有限的。

2.3 串补度的影响

串补装置的使用也是影响次同步振荡特性的重要因素,本课题在上述实验得出最新参数的基础上对此模型进行仿真,进而研究串补度 K_c 对次同步振荡的影响,分别将串补度设置为 40%、50% 及 60% 进行仿真,其功率动态波形如图 12 所示。7 s 时,串补度为 50% 和 60% 的曲线开始有不同

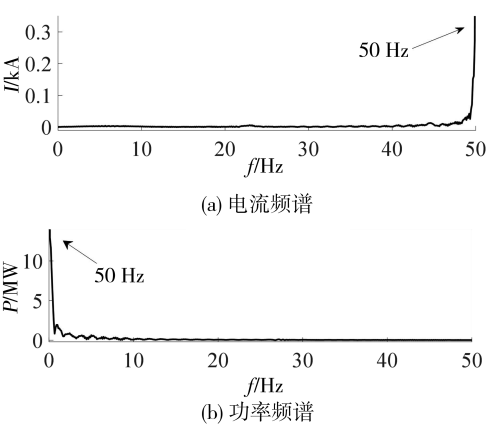


图 11 调整适合参数后风场电流与有功功率频谱图
Fig.11 Wind farm current and active power spectrum after adjusting suitable parameters

程度的发散形态,后者的发散速度更快且幅值更大。因此,串补度的增大会使振荡更加剧烈,增加次同步振荡风险。

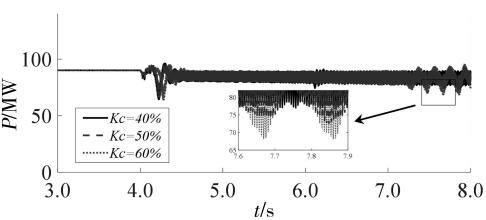


图 12 不同串补度对功率振荡波形的影响
Fig.12 Influence of different series compensation degree on power oscillation waveform

2.4 换流器直流侧电容的影响

换流器直流侧电容 C_{dc} 大小发生变化时对风场有功功率振荡波形的影响如图 13 所示,随着电容 C_{dc} 的增大,有功功率的振荡幅值有所减小,当其大于 20 000 μF 时,对波形的影响十分微小,继续增大电容值意义不大,所以适当增加直流侧电容 C_{dc} 的大小,可以减小 SSO 带来的危害。

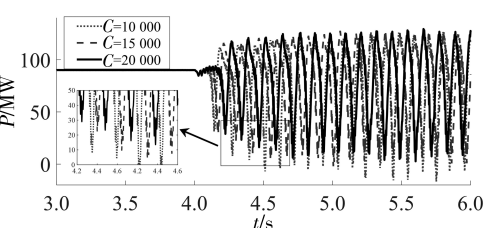


图 13 换流器直流侧电容对功率振荡波形的影响
Fig.13 Influence of DC side capacitance of converter on power oscillation waveform

3 结论

为分析串联补偿技术与柔性直流输电技术在远距离电能输送所引起的新型次同步振荡的问题,利用PSCAD软件对其进行建模,调试出次同步振荡现象,并通过频谱分析验证此现象的准确性。利用时域分析法研究GSC中内环控制参数、串补度及直流侧电容对SSO风险的影响,得出如下结论:

1)当系统接入串补时易生次同步振荡,通过调节网侧换流器内环控制参数得出结论:在所用模型参数范围内,减小 K_{pgd} 至0.5,SSO风险减小;随着 K_{igd} 的增大,SSO风险减小;随着 K_{pgd} 减小,

SSO风险略微减小;随着 K_{igd} 增大,SSO风险略微减小。合适的内环控制参数能够对SSO产生一定程度的抑制效果,以此减小SSO带来的危害。

2)选择适合的内环参数对次同步振荡已有一定的抑制作用,但难于抑制过高串补带来的次同步振荡。由于串补度的不断增大,其抑制效果逐渐减弱,有功功率的振荡曲线也不断发散,SSO风险也在增加。实际工程中可以通过降低串补来尽可能避免次同步振荡,从而提高系统稳定性。

3)SSO的风险随着直流侧电容的增大而减小。为了降低次同步振荡带来的危害,可以在不影响系统稳定性的前提下适当增大直流侧的电容值。

参考文献:

- [1] 国家能源局.国家能源局发布1-3月份全国电力工业统计数据[R/OL].[2023-03-21].http://www.nea.gov.cn/2023-04/23/c_1310713239.htm
- [2] 吴熙,徐珊珊,冯双等.基于改进自适应陷波的双馈风电场时变次同步振荡抑制策略[J/OL].中国电机工程学报:1-13[2023-06-27].<https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222603>.
- [3] 王伟胜,张冲,何国庆,等.大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J].电网技术,2017,41(4):1050-1060.
- [4] 陈晨,杜文娟,王海风.风电场接入引发电力系统次同步振荡机理综述[J].南方电网技术,2018,12(1):84-93.
- [5] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
- [6] 吕佃顺,许洪华,马强,等.直驱变流器接入弱电网次同步振荡机理分析[J].太阳能学报,2021,42(5):423-429.
- [7] 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.
- [8] 邵冰冰,赵书强,裴继坤,等.直驱风电场经VSC-HVDC并网的次同步振荡特性分析[J].电网技术,2019,43(9):3344-3355.
- [9] 高本锋,崔意婵,邵冰冰,等.直驱风电机组全运行区域的次同步振荡特性分析[J].电力建设,2020,41(2):85-93.
- [10] 万玉良,朱玲,项颂,等.直驱风电机组与弱电网交互作用稳定分析[J].中国电力,2019,52(9):118-125.
- [11] 杨博闻,占颖,谢小荣,等.双馈风电场接入串补输电系统引发次同步谐振的研究模型[J].电力系统保护与控制,2020,48(8):120-126.
- [12] 黄守道,高剑,罗德荣.直驱永磁风力发电机设计及并网控制[M].北京:电子工业出版社,2014.

(责任编辑:方素华)