

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180250

VSC 变流器与弱电网交互作用的次同步振荡关键参数研究

杜平¹, 万玉良¹, 项颂¹, 朱玲², 李威², 陈璐¹

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古自治区 呼和浩特 010020;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 电压源型变流器(VSC)接入弱同步电网后与电网交互作用显著, 易引发系统次同步频带的稳定性问题。为研究这一现象的机理和特性, 建立包含锁相环、电压前馈等环节的 VSC 变流器小信号数学模型。采用特征值分析方法进行系统振荡模态、阻尼比、相关因子计算, 分析得出影响系统次同步频带稳定性的关键因素及变化规律。结果显示, 增强电网网架结构, 优化 VSC 变流器中的锁相环和电压前馈滤波参数可以减小系统振荡风险。最后通过电磁暂态仿真对上述分析结论进行了验证。

关键词: VSC 变流器; 直驱风力发电机; 锁相环; 电压前馈控制; 相关因子

Study on key parameters of subsynchronous oscillation between VSC converter and weak power grid

DU Ping¹, WAN Yuliang¹, XIANG Song¹, ZHU Ling², LI Wei², CHEN Lu¹

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited, Hohhot 010020, China;

2. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: Voltage-source Converters (VSC) have significant interaction with the power grid after being connected to the weak synchronous grid, which easily leads to the stability problem of sub-synchronous frequency band. In order to study the mechanism and characteristics of this phenomenon, a small signal model of VSC grid connected converter containing PLL and voltage feedforward control loop is constructed. The eigenvalue analysis method is used to calculate the system oscillation modes, damping ratios, and related factors. The key factors affecting the stability and changing rules are analyzed. The results show that the system oscillation risk can be reduced by enhancing the grid structure and optimizing the phase lock loop and voltage forward feed filter parameters in the VSC converter. Finally, the analysis results are verified by electromagnetic transient simulation.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 52660019000A) and Fund of State Grid East Inner Mongolia Electric Power Company Limited "Study on the Risk Analysis and Defense Technology of the Subsynchronous Oscillation in Large-Scale Wind Power Transmission Grid" (No. SGMD0000DDJS1701168).

Key words: voltage source converter; direct drive wind power generation; phase-locked loop; voltage feed-forward control; correlation factor

0 引言

传统的次同步振荡研究主要集中于串补和直流与传统火电机组^[1-3]间产生的振荡现象。随着电力系统电力电子化程度不断加深, 以及电网结构复杂性的提高, 以 VSC(电压源型)变流器为代表的新能源并网系统振荡稳定性问题日益突出^[4]。一方面, VSC

变流器因采用 LCL 滤波器易引发高频谐振, 目前通常采用无源阻尼和有源阻尼控制进行抑制, 取得了较好的工程应用成果^[5]; 另一方面, 随着新能源占比不断攀高以及特高压直流的投运, VSC 并网系统的短路比(SCR)不断降低, 将可能导致 VSC 系统失稳。2015 年, 我国西北电网持续出现因大规模新能源集中并网导致的系统次同步振荡现象, 并引发火电机组轴系扭振保护切机^[6], 不同于双馈风电场经串补输出发生次同步振荡的现象^[7-11], 新疆附近电网无串补装置。此外, 我国某 MMC-HVDC 风电场并网工程在调试期间, 随着风电场出力增加, 系统中也逐渐出现 20~30 Hz 的次同步振荡^[12]。文献[13]

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(52660019000A); 国网内蒙古东部电力有限公司项目“大规模风电特高压外送电网次同步振荡风险分析与防御技术研究”(SGMD0000DDJS1701168)

研究了直驱机组在无串补情况下引发电网次同步振荡的机理, 但并未涉及直接推导直驱风电机组的阻抗模型。文献[14]研究了大型双馈风电场经 MMC-HVDC 系统并网出现的 SSO 现象, 但未指出次同步振荡中的关键影响环节, 无法指导装置的控制优化。文献[15]考虑了锁相环的影响, 对单相并网逆变器进行阻抗建模和稳定性分析, 但其没有推广到三相并网逆变器系统。

本文以 VSC 变流器为研究对象, 着重考虑锁相环控制对系统小信号模型的影响, 推导建立了包含变流器主体、LC 滤波、锁相环、电流内环、电压前馈、PWM 控制等控制环节的小信号数学模型, 研究了 VSC 变流器的振荡模态及关键影响环节参数, 通过电磁暂态仿真验证了关键参数的影响特性。

1 VSC 变流器小信号模型

1.1 VSC 变流器数学模型

VSC 变流器结构主要由 LC 滤波器、IGBT 开关模块、直流母线电容以及控制系统组成, 其 dq 轴的传递函数模型如图 1 所示^[16-17]。

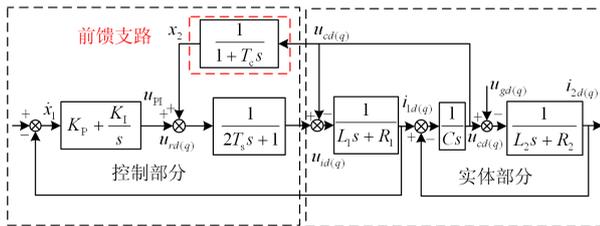


图 1 VSC 变流器控制系统在 dq 轴系下的框图

Fig. 1 VSC converter control system block diagram

under dq axis

图 1 中, L_1 、 R_1 为变流器的网侧电感和电阻; L_2 、 R_2 为折算至低压侧的电网等效电感和电阻; C 为变流器的网侧滤波电容; $i_{1d(q)}$ 、 $i_{1q(q)}$ 分别为流经变流器的网侧电感 L_1 和流经电网等效电感 L_2 的 $d(q)$ 轴电流分量; $u_{id(q)}$ 、 $u_{gd(q)}$ 和 $u_{cd(q)}$ 分别为换流阀交流侧电压 $d(q)$ 轴分量、电网电压 $d(q)$ 轴分量和滤波电容电压 $d(q)$ 轴分量; K_p 和 K_i 分别代表内环控制器的比例和积分增益; T_c 、 T_s 分别代表电压前馈滤波和网侧变流器的时间常数; x_1 、 x_2 、 u_{p1} 为控制环节引入的中间变量。

1.2 锁相环对 VSC 变流器小信号模型的影响

锁相环分为单序锁相环^[18]和双序锁相环^[19-20], 不考虑电网不平衡的影响, 双序锁相环特性与单序锁相环基本一致, 本文以传统的单序锁相环进行分析。单序锁相环将三相同步参考电压由三相静止坐

标系变换到同步旋转坐标系, 通过 PI 调节器使得电压 q 轴分量为零, 达到锁定的电压角度 θ_1 与电网电压实际角度 θ 重合的目的, 具体实现框图如图 2 所示。

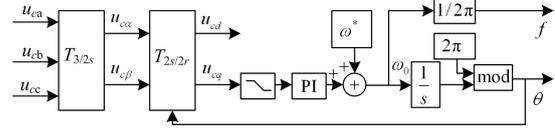


图 2 单序锁相环控制原理

Fig. 2 Principle diagram of SPLL control

当电网电压波动或并网电流发生变化时, 同步参考电压 u_c 会受到不同程度的扰动作用, 此时锁相环输出的同步角 θ_1 与其实际值 θ 会出现偏差 $\Delta\theta$, 即 $\theta_1 = \theta + \Delta\theta$ 。这将导致控制系统的 dq 轴系分量 x'_{dq} 与实际运行系统的 dq 轴系分量 x_{dq} 存在误差, 根据文献[17]得到

$$\begin{cases} \Delta x'_d = \Delta x_d + \Delta\theta x_{q0} \\ \Delta x'_q = \Delta x_q - \Delta\theta x_{d0} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 小扰动过程中同步参考电压对锁相环造成的影响会使控制系统状态变量产生附加扰动分量, 从而改变系统动态特性。根据式(1)可得同步参考电压在 q 轴下的分量, 可以描述为

$$\Delta u'_{cq} = \Delta u_{cq} - \Delta\theta U_{cd0} \quad (2)$$

结合图 2 与式(1)、式(2)可得小扰动情况下单序锁相环的 q 轴控制框图如图 3 所示, 其中包括锁相环内对 q 轴电压进行滤波的一阶低通滤波器和锁相环的 PI 控制器。

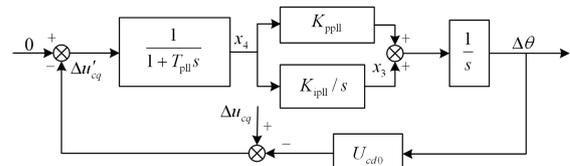


图 3 单序锁相环控制框图

Fig. 3 Principle diagram of SPLL control block diagram

引入中间变量 x_3 、 x_4 可得电压相角误差 $\Delta\theta$ 与同步参考电压 q 轴分量 $\Delta u'_{cq}$ 之间的关系。

$$\begin{cases} \Delta\dot{\theta} = x_3 + K_{ppll}x_4 \\ \dot{x}_3 = K_{ipll}x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{T_{pll}}(\Delta u'_{cq} - U_{cd0}\Delta\theta - x_4) \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_{pll} 为锁相环内对 q 轴电压进行一阶低通滤波的时间常数; K_{ppll} 和 K_{ipll} 分别代表锁相环 PI 控制器的比例和积分增益。

1.3 考虑锁相环影响的 VSC 变流器小信号模型

正常运行情况下, 功率因数为 1, 稳态情况下有 $U_{cq0} \approx 0$ 、 $U_{rq0} \approx 0$ 、 $I_{lq0} \approx 0$, 而 U_{cd0} 、 U_{rd0} 、 I_{ld0} 接近峰值, 根据式(2)可进一步看出上述状态变量的 q 轴分量影响明显大于 d 轴, 因此本文以易受影响的 q 轴分量进行分析。

扰动情况下出现的锁相环角度偏差将会对 VSC 变流器控制模型中的反馈电流 i_l 、控制输出电压 u_r 、滤波电容电压 u_c 产生影响, 需要采用式(1)对图 1 中的 i_l 、 u_r 、 u_c 进行相应的修正, 系统实体部分角度偏差不会对其产生影响不需要进行修正。修正后的变流器 q 轴小扰动模型如图 4 所示。

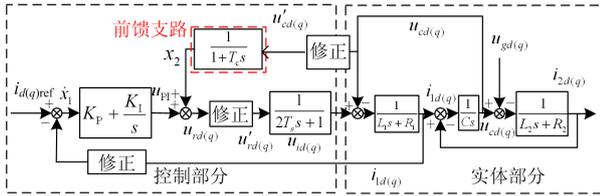


图 4 计及锁相环影响的 VSC 变流器动态模型

Fig. 4 Transient equivalent model of VSC converter

图中修正后的前馈电压 $\Delta u'_{cq}$ 、控制输出电压 $\Delta u'_{rq}$ 、反馈电流 $\Delta i'_{lq}$ 表达式如下。

$$\Delta u'_{cq} = u_{cq} - U_{cd0} \Delta \theta \quad (4)$$

$$\Delta u'_{rq} = x_2 + u_{pl} + U_{rd0} \Delta \theta \quad (5)$$

$$\Delta i'_{lq} = \Delta i_{lq} - i_{ld0} \Delta \theta \quad (6)$$

对图 4 控制部分进行 q 轴分量的小扰动分析, 可得

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \Delta i_{qref} - \Delta i'_{lq} \\ u_{pl} = K_p (\Delta i_{qref} - \Delta i'_{lq}) + K_l x_1 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{T_c} (\Delta u'_{cq} - x_2) \\ \Delta i'_{lq} = \frac{1}{2T_s} (\Delta u'_{rq} - \Delta u_{lq}) \end{cases} \quad (7)$$

实体部分进行 q 轴分量的小扰动分析, 可得

$$\begin{cases} \frac{d\Delta u_{cq}}{dt} = \frac{1}{C} (\Delta i_{lq} - \Delta i_{2q}) \\ \frac{d\Delta i_{lq}}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_{lq} - u_{cq} - i_{lq} R_1) \\ \frac{d\Delta i_{2q}}{dt} = \frac{1}{L_2} (u_{cq} - u_{gq} - i_{2q} R_2) \end{cases} \quad (8)$$

联立式(3)~式(8)得到小扰动下 VSC 变流器的并网 9 阶状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (9)$$

式中, 系统状态变量 x 为实体部分的 Δi_{lq} 、 Δi_{2q} 、 Δu_{cq} 和控制部分 Δu_{lq} 、 $\Delta \theta$ 、中间变量 $x_1 \sim x_4$ 。控制输入变量为 Δu_{gq} 。

2 VSC 变流器与弱电网交互作用振荡模式及关键参数分析

VSC 并网变流器系统状态方程中, 变流器电感 L_1 、电阻 R_1 、滤波电容 C , 变流器等效的延时环节为装置的固有参数, 保持不变。电流内环控制的 PI, 电网电压前馈滤波模型和锁相环模型都属于控制系统, 受内环增益 K_p 、锁相环增益 K_{pll} 、锁相环滤波时间常数 T_{pll} 、电压前馈滤波时间常数 T_c 等控制参数影响, 可进行优化调整。此外, 不同区域电网网架也将会对系统振荡模式产生影响, 所以电网等效电抗 L_2 、电网等效电阻 R_2 应当被当作变量。

采用 VSC 变流器的典型参数, 其中电压前馈滤波取 50 Hz, 锁相环 q 轴滤波取 100 Hz, 特征值如表 1 所示。

表 1 系统特征值分析

Table 1 Eigenvalues of system

| 序号 | 特征值 | 振荡频率/Hz | 阻尼比 |
|-----------------|-----------------------|---------|---------|
| $\lambda_{1,2}$ | $-55.62 \pm 7050.51i$ | 1 122.7 | 0.007 9 |
| $\lambda_{3,4}$ | $-884.04 \pm 331.23i$ | 52.74 | 0.936 4 |
| $\lambda_{5,6}$ | $6.59 \pm 177.87i$ | 28 | -0.037 |
| λ_7 | $-183.91 + 0.00i$ | 0 | 1.000 0 |
| λ_8 | $-36.97 + 0.00i$ | 0 | 1.000 0 |
| λ_9 | $-1.00 + 0.00i$ | 0 | 1.000 0 |

从表 1 中可以清晰地看出, 特征值 $\lambda_{5,6}$ 中存在正实根, 因此整个系统处于发散状态, 系统不稳定。进一步进行各振荡模式下相关因子分析, 结果如表 2 所示。

表 2 各特征值相关因子

Table 2 Participation factors of eigenvalues of system

| 状态变量 | 特征值 | | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| | $\lambda_{1,2}$ | $\lambda_{3,4}$ | $\lambda_{5,6}$ | λ_7 | λ_8 | λ_9 |
| Δu_{cq} | 0.495 6 | 0.003 2 | 0.001 6 | 0.000 4 | 0.000 0 | 0.000 0 |
| Δi_{lq} | 0.393 9 | 0.060 4 | 0.207 7 | 0.124 6 | 0.101 5 | 0.000 0 |
| Δi_{2q} | 0.103 8 | 0.038 3 | 0.410 1 | 0.134 8 | 0.014 8 | 0.000 7 |
| x_2 | 0.002 4 | 0.298 8 | 0.159 2 | 0.715 6 | 0.007 6 | 0.000 2 |
| x_4 | 0.000 3 | 0.780 7 | 0.069 8 | 0.163 4 | 0.000 4 | 0.000 8 |
| x_3 | 0.000 0 | 0.005 4 | 0.016 1 | 0.036 8 | 0.004 4 | 1.031 9 |
| $\Delta \theta$ | 0.000 3 | 0.345 3 | 0.228 9 | 0.411 9 | 0.006 6 | 0.033 7 |
| Δu_{lq} | 0.004 4 | 0.714 9 | 0.199 6 | 0.104 8 | 0.002 8 | 0.000 0 |
| x_1 | 0.000 0 | 0.003 8 | 0.056 9 | 0.081 5 | 1.093 3 | 0.000 2 |

相关因子分析结果表明, 状态变量 Δi_{iq} 、 Δi_{2q} 、 $\Delta \theta$ 、 x_2 对应特征值 $\lambda_{5,6}$ 所在模态的相关因子较大, 即当前运行功率、锁相环参数、电压前馈参数、内环控制参数均对该模态影响关键。依次改变上述参数(保持其余参数不变), 小扰动特征值分析比对结果如表 3 所示。

表 3 小扰动特征值分析比对结果

Table 3 Comparison results of small disturbance characteristic value

| 固定变量 | 变化参数 | 特征值 $\lambda_{5,6}$ | 振荡频率/Hz | 备注 |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------|----|
| $K_{ppil}=0.81$ | $L_2=320 \mu\text{H}$ | $6.59 \pm 177.87i$ | 28 | 振荡 |
| $T_{pil}=0.0016$ | $L_2=220 \mu\text{H}$ | $-11.59 \pm 213.36i$ | 33 | 稳定 |
| $T_c=0.0032$ | $L_2=120 \mu\text{H}$ | $-52.59 \pm 251.02i$ | 40 | 稳定 |
| $K_p=0.02$ | | | | |
| $L_2=320 \mu\text{H}$ | $K_{ppil}=0.81$ | $6.59 \pm 177.87i$ | 28 | 振荡 |
| $T_{pil}=0.0016$ | $K_{ppil}=0.5$ | $4.35 \pm 168.2i$ | 26 | 振荡 |
| $T_c=0.0032$ | $K_{ppil}=0.2$ | $-8.94 \pm 138.94i$ | 22 | 稳定 |
| $L_2=320 \mu\text{H}$ | $T_{pil}=0.0016$ | $6.59 \pm 177.87i$ | 28 | 振荡 |
| $K_{ppil}=0.81$ | $T_{pil}=0.0008$ | $0.71 \pm 179.16i$ | 28 | 振荡 |
| $T_c=0.0032$ | $T_{pil}=0.0004$ | $-2.24 \pm 179.30i$ | 28 | 稳定 |
| $L_2=320 \mu\text{H}$ | $T_c=0.0032$ | $6.59 \pm 177.87i$ | 28 | 振荡 |
| $K_{ppil}=0.81$ | $T_c=0.0016$ | $-0.60 \pm 208.67i$ | 33 | 接近 |
| $T_{pil}=0.0016$ | $T_c=0.0004$ | $-29.75 \pm 227.27i$ | 36 | 稳定 |

结果表明随着 L_2 的减小, 特征值 $\lambda_{5,6}$ 从正实部转变为负实部, 整体上来看特征值的实部呈减小趋势, 虚部呈增大趋势。因此电网强度越弱, 系统发生次同步振荡的风险越大。锁相环增益系数减小可明显降低系统振荡风险, 且振荡频率随之下降。此外, 锁相环内 q 轴电压滤波时间常数和电压前馈滤波时间常数对 VSC 变流器系统的振荡特性影响显著, 分析结果表明, 较小的低通滤波时间常数(较大的截止频率)有助于并网系统稳定。

3 电磁暂态仿真验证

建立 VSC 变流器与弱系统连接的电磁暂态模型, 变流器 2 MW 运行, 控制参数与上文特性分析参数保持一致, 对上文基于小信号模型的关键参数及影响趋势进行仿真验证。3 s 左右依次改变电网等效电抗 L_2 、锁相环 PI 环节增益系数、锁相环 q 轴电压滤波频率和电压前馈环节滤波频率, 仿真波形如图 5—图 9 所示。

如图 5、图 6 显示, 电网等效电抗取 200 μH 时, 系统稳定运行, 3 s 将电网等效电抗改变至 320 μH 时, 系统功率发生 27.5 Hz 的振荡, 振荡特性与表 3

的分析基本一致。如图 7 显示, 电网等效电抗取 320 μH , 激发系统次同步功率振荡后, 将锁相环 PI 环节增益系数由原来的 0.81 减小至 0.2, 振荡逐渐

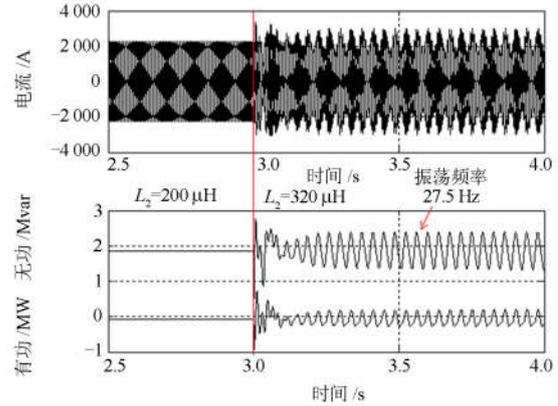


图 5 电网不同强弱下系统仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform under different power grid strength

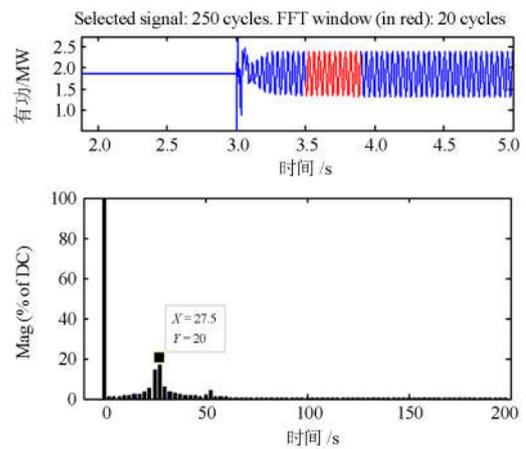


图 6 有功功率次同步振荡频率分析

Fig. 6 Frequency analysis of sub-synchronous oscillations wave

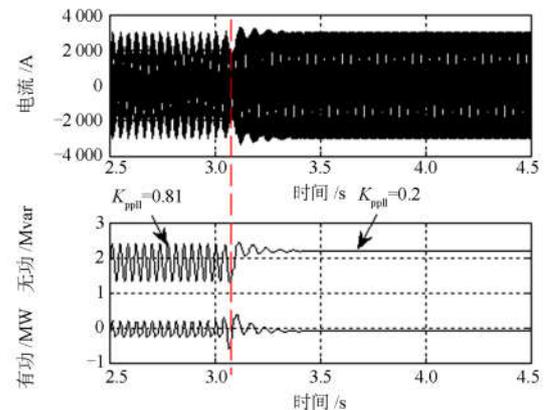


图 7 改变锁相环 PI 增益参数系统仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of different phase-locked loop PI control gain parameter

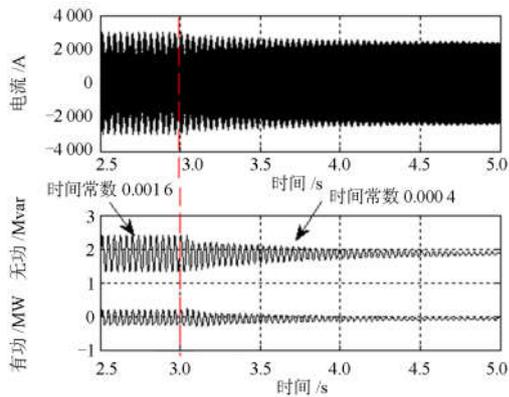


图 8 改变锁相环滤波参数系统仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of different phase-locked loop filter parameter

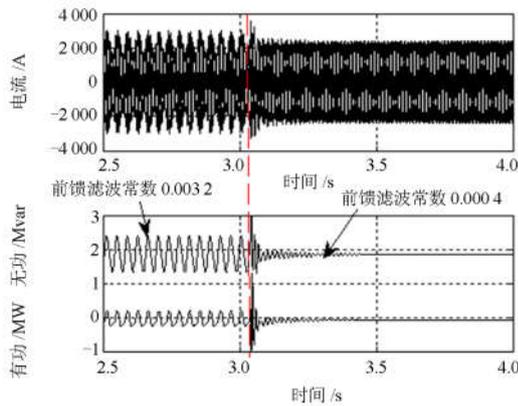


图 9 改变电压前馈滤波参数系统仿真波形

Fig. 9 Simulation waveform of different voltage feedforward filter parameter

消失。图 8 显示, 电网等值电抗取 $320 \mu\text{H}$ 系统发生功率振荡后, 调整锁相环 q 轴电压滤波参数, 由原来的滤波时间常数 0.0016 (截止频率约为 100 Hz) 调整至 0.0004 (截止频率约为 400 Hz), 系统振荡逐渐平息。图 9 显示, 电网等值电抗取 $320 \mu\text{H}$ 激发系统振荡现象后, 将前馈电压滤波时间常数 0.0032 (截止频率 50 Hz) 调整至 0.0004 (截止频率 400 Hz), 系统快速恢复稳定。上述电磁暂态仿真结果与表 3 的分析基本对应, 较好地验证了上述参数对风电机组并网系统稳定特性的影响。

4 结论

本文建立了考虑锁相环和电压前馈控制影响的 VSC 并网变流器小扰动下的详细模型, 采用特征值分析方法进行了振荡模态分析, 通过阻尼比、相关因子计算, 研究了 VSC 并网变流器与弱电网交互作用下的次同步振荡机理及关键影响参数, 结果表明,

一定控制参数下, VSC 变流器与弱电网连接存在次同步频带的振荡风险, 且变流器连接电网强度越弱, 诱发电网次同步振荡的风险越大, 振荡频率越低。在系统次同步振荡模态中, VSC 变流器的锁相环和前馈环节参数对其影响显著, 适当减小锁相环增益系数, 提高锁相环 q 轴电压滤波频率和电网电压前馈滤波频率可在一定程度上提高系统的稳定性。

需要说明的是, 本文侧重于 VSC 变流器因自身特性引发弱电网次同步频带振荡的分析, 后期将进一步研究系统内多种类型电力电子装置间的交互影响。

参考文献

- [1] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-4.
WEN Jinyu, SUN Haishun, CHENG Shijie. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Technology, 2008, 36(12): 1-4.
- [2] 时伯年, 李树鹏, 梅红明, 等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-118.
SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC_HVDC and VSC_HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-118.
- [3] 刘革明, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136.
LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.
- [4] 袁小明, 程时杰, 胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [5] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中 LCL 滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.
XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Binpeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4153-4166.
- [6] 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.
- [7] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 84-91.
CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 84-91.
- [8] 朱玲, 许翔, 侯玉强, 等. 基于宽频带转子附加阻尼的双馈型风机次同步振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 37-42.
ZHU Ling, XU Xiang, HOU Yuqiang, et al. A suppression strategy for DFIG subsynchronous oscillation based on broadband rotor additional damping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 37-42.
- [9] AMIR O, AMIRNASER Y, RAJIV K V. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.
- [10] 张剑, 肖湘宁, 高本锋, 等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 142-149.
ZHANG Jian, XIAO Xiangning, GAO Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on sub-synchronous control interaction of a DFIG-based wind-power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149.
- [11] FAN Lingling, KAVASSERI R, ZHIXIN L M, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.
- [12] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
LÜ Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860.
- [13] 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.
- [14] 徐坤, 赵成勇, 高本锋. VSC-HVDC 的次同步阻尼特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 1-5.
XU Kun, ZHAO Chengyong, GAO Benfeng. Study on sub-synchronous damping characteristic of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 1-5.
- [15] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability problem caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [16] 孙素娟, 翟炜, 瞿兴鸿, 等. 可适应宽频带的抗混叠有源阻尼控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(20): 5310-5316.
SUN Sujuan, ZHAI Wei, QU Xinghong, et al. Anti-aliasing active damping control strategy adaptable for wide band[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5310-5316.
- [17] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [18] WANG P, ZHU L, ZHANG K. An instantaneous phase angle detection algorithm under asymmetric grid voltage dips[C] // Applied Mechanics & Materials, 2013, 291-294: 401-406.
- [19] 朱玲, 卫泽, 朱丹, 等. 不对称低电压下的电网电压角度检测[J]. 电气传动自动化, 2016, 38(3): 54-57.
ZHU Ling, WEI Ze, ZHU Dan, et al. Voltage angle detection of power grid under asymmetric low voltage[J]. Electric Drive Automation, 2016, 38(3): 54-57.
- [20] 张治俊, 李辉, 张熙, 等. 基于单/双同步坐标系的软件锁相环建模和仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 138-144.
ZHANG Zhijun, LI Hui, ZHANG Xu, et al. Simulation and modelling of software phase-locked loop based on single/double synchronous coordinate system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 138-144.
- [21] 周诗颖, 邹旭东, 童力, 等. 考虑锁相环影响的 LCL 型并网变换器电流环控制器参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 1075-1089.
ZHOU Shiyong, ZOU Xudong, TONG Li, et al. Design of LCL-type grid-connected converter current loop controller parameters considering effects of phase locked loops[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 1075-1089.

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-05-08

作者简介:

杜平(1962—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、电网安全稳定管理;

王玉良(1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化;

朱玲(1986—), 女, 高级工程师, 通信作者, 研究方向为新能源并网稳定分析. E-mail: 1678424852@qq.com

(编辑 许威)