

经柔性直流输电并网的直驱风电场次同步振荡特性分析

王福建, 汤季宇

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132011)

摘要: 针对经柔性直流输电并网的直驱风电场引发的次同步振荡问题, 在建立 26 阶的全系统线性化状态空间模型的基础上, 通过特征值分析和参与因子分析, 研究了直驱风电场经 VSC-HVDC 并网系统的次同步振荡特性。同时, 基于根轨迹法进一步研究了风电并网距离和控制器 PI 参数对振荡模式特性的影响。结果表明, 直驱风电场接入柔直系统后, 存在风电场与 VSC-HVDC 系统交互作用引发的次同步振荡风险; 风电并网距离对次同步振荡模式影响较大, 线路距离越远, 系统失稳可能性越大。最后, 通过时域仿真验证了理论分析的正确性。

关键词: 直驱风电场; VSC-HVDC; 特征值分析; SSO; 频率响应

Analysis of sub-synchronous oscillation characteristics of direct-drive wind farms via VSC-HVDC

WANG Fujian, TANG Jiyu

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132011, China)

Abstract: Aiming at the problem of sub-synchronous oscillation(SSO) caused by direct-driven wind farms connected to the grid via flexible DC transmission, the characteristics of sub-synchronous oscillation of direct-driven wind farms connected to the grid via VSC-HVDC through eigenvalue analysis and participation factor analysis based on the establishment of a 26-order full-system linearized state-space model is studied. At the same time, based on the root locus method, the influence of grid connection distance, and controller PI parameters on the characteristics of each oscillation mode were further studied. The results showed that when the direct drive wind farm was connected to the VSC-HVDC, there was a risk of sub-synchronous oscillation (SSO) caused by the interaction between the wind farms and the VSC-HVDC, The distance of wind power grid connection had a great influence on the SSO mode. The longer the grid connection distance, the greater the possibility of system instability. Finally, the correctness of the theoretical analysis was verified by time-domain simulation.

Key words: direct-drive wind farms; VSC-HVDC; eigenvalue analysis; SSO; frequency response

0 引言

随着新能源产业蓬勃发展, 我国风电装机容量稳步上升, 其中永磁直驱风机占比逐年增大。

同时, 风电存在赋存与需求逆向分配的问题, 柔性直流输电 (Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC) 因控制灵活、安全可靠性和输出谐波含量小等优

点,在我国大容量、长距离的电能输送系统中应用广泛^[1-2]。据统计,目前已有8项柔性直流输电工程。其中,上海南汇、舟山、厦门和鲁西等地项目已先后投运,2020年投运的张北柔性直流电网试验示范工程实现了对风电能源的集中开发外送消纳^[3]。

然而,直驱风电场与柔直换流站间包含大量电力电子器件及多种控制环节,动态交互形式较为复杂,可能引发系统产生次同步振荡(Sub-Synchronous Oscillation, SSO)风险^[4]。据统计,2015年福建厦门风电场接入柔性直流输电系统时,系统出现非衰减非等幅的次同步振荡现象,其频率约为24 Hz^[5]。此外,在南澳柔直工程调试期间,随着风电场出力增加,并网系统发生20~30 Hz的次同步振荡现象,造成柔直系统停运,风场切机^[6]。因此,研究直驱风电场经柔性直流输电(Direct-Drive Wind Farms via VSC-HVDC, DDWFBVH)系统稳定性问题有着重要的理论与工程意义。

近年来,国内外学者针对次同步振荡问题开展了广泛研究,文献[7]指出风电场经柔性直流外送系统涉及多控制环节,控制器运行方式不合理以及控制参数配置不当时,不同控制环节间的频带重叠效应将诱发容性负阻尼特性,引发系统发生SSO。文献[8-9]通过小信号建模和阻抗分析

研究了控制器强相关参数对SSO的影响,对其他系统结构参数分析较少。文献[10-12]基于特征值法分析了双馈风电场经柔直并网的SSO问题,研究场景与本文有所不同。文献[13-17]分析了直驱风电场并网时,直驱风电场与弱交流电网发生动态交互,使得直驱风机在次同步频段呈现负阻尼满足振荡特性,从而引发SSO,但没有考虑柔直接入对次同步振荡特性的影响。

本文以DDWFBVH并网系统作为研究对象,首先根据直驱风电场和VSC-HVDC系统的动态数学模型,建立了26阶的DDWFBVH系统线性化状态空间模型;然后基于所建立的模型,通过参与因子分析,发现了直驱风电场与VSC-HVDC间动态交互引发的SSO模式,并分析了相关参数对振荡模式的影响情况;最后通过时域仿真验证了理论分析的正确性。

1 DDWFBVH系统动态模型

图1为DDWFBVH并网系统结构示意图,主要包括直驱风电场系统和VSC-HVDC系统。直驱风电场由20台型号相同的典型直驱风电机组等值聚合而成,风力机与永磁同步发电机相连,经背靠背换流器后升压至35 kV,最后通过交流输电线路输送至汇流母线,经换流站升压变压器升压至110 kV后接入VSC-HVDC系统。

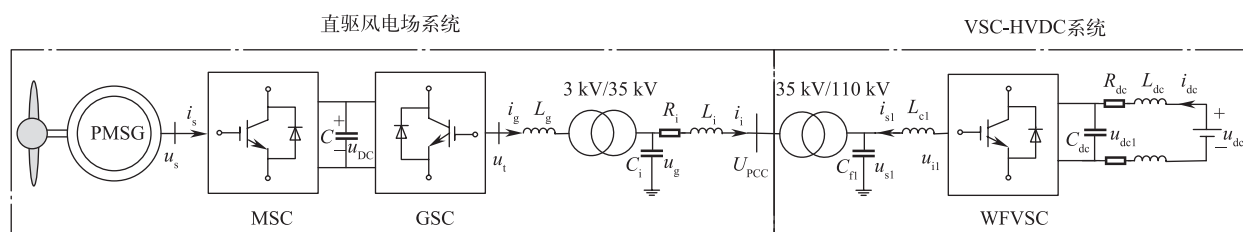


图1 DDWFBVH 并网系统结构

Fig. 1 Structure of the direct-drive wind farms via VSC-HVDC system

1.1 直驱风电场系统数学模型

直驱风电场系统拓扑及控制系统如图2所示,系统主要由风力机、永磁同步发电机、背靠背全功率变流器、风机锁相环和输出滤波电感组成^[18]。PMSG采用发电机惯例, q 轴超前

d 轴 90° 。直驱风电场等效机组的机侧变流器(Machine-Side Controller, MSC)及网侧变流器(Grid-Side Controller, GSC)采用 dq 轴双闭环解耦控制策略。MSC采用基于转子磁链定向的最大转矩控制策略,定子电流全部用于产生

电磁转矩，实现最大转矩优化控制；GSC采用基于电网电压定向的直流电压控制策略，稳定直流母线电压，调节风力机并网时的有功功率和无功功率。

图2中， u_s 、 i_s 分别为MSC交流侧输入电压和电流； u_{DC} 、 C 分别为直流环节的母线电压和支撑电容； i_g 、 u_t 、 u_g 分别为GSC交流侧输出电流、桥臂电压和端口电压； u_g' 、 i_i 分别为变压器二次侧输出电压和流经交流线路的电流； R_i 、 C_i 、 L_i 分别为交流线路的等效电阻、电容和电感； L_g 为滤波电感。

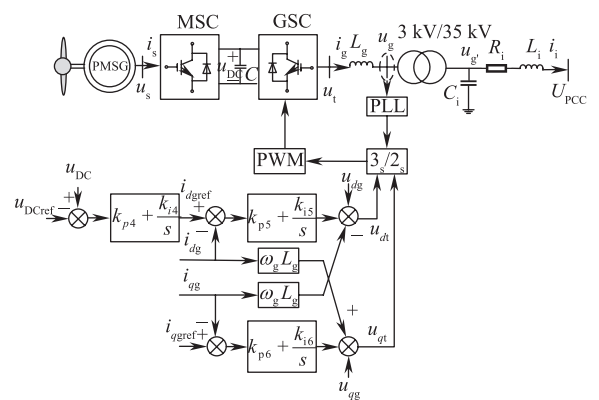


图2 直驱风电场拓扑结构及其控制系统

Fig. 2 Structure and control diagram of the direct-drive wind farm

锁相环（Phase-Locked Loop，PLL）为典型定子电压定向型，控制目标为变流器端口输出电压 $u_q=0$ ^[19]，结构如图3所示。图3中， u_a 、 u_b 、 u_c 为变流器端口输出三相电压； u_{dg} 、 u_{qg} 分别为变流器端口输出电压 d 轴和 q 轴分量； k_{p_pll} 、 k_{i_pll} 分别为锁相环PI控制器比例系数和积分系数； θ 为PLL输出相角； ω_0 为基准角速度。受限于篇幅，直驱风电场系统的运行参数和控制参数见表1～表4。

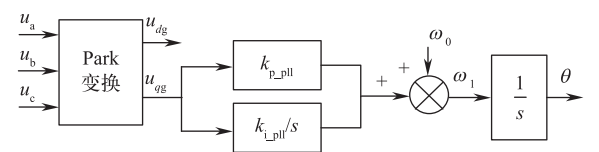


图3 锁相环控制结构图

Fig. 3 Control diagram of the PLL

表1 直驱风电场系统参数

Tab. 1 Parameters of the direct-drive wind farm system

模块	参数	取值
直驱风电机组参数	风机半径 R/m	63.8
	大气密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.15
	风轮风速 $v/(\text{m}/\text{s})$	10
	风能利用系数 C_p	0.431
	发电机转子磁链 ψ_f/Wb	0.041 7
	发电机极对数 n_p	49
	单质块的转速 $\omega/(\text{rad}/\text{s})$	1.282 28
	单质块的转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.726 7
	单质块的自阻尼系数 R_o	0.01
	基准频率 f/Hz	50
	发电机定子等效电阻 R_s/Ω	0.01
	发电机定子等效电感 L_s/mH	40
	直流支撑电容 C_{dc}/mF	12 000
	网侧换流站滤波电感 L_g/mH	2
交流输电线路参数	发电机额定容量 $/\text{MV}\cdot\text{A}$	5
	交流线路等效电阻 R_l/W	0.05
	交流线路等效电容 C_l/mF	2
	交流线路等效电感 L_l/mH	1

表2 直驱风电场换流器参数

Tab. 2 Parameters of the direct-drive wind farm system converter controller

模块	含义	取值
MSC	电流内环 d 轴比例、积分系数	$k_{p1}=1, k_{i1}=5$
	电压外环 q 轴比例、积分系数	$k_{p2}=0.4, k_{i2}=2.5$
	电流内环 q 轴比例、积分系数	$k_{p3}=1, k_{i3}=5$
GSC	电压外环 q 轴比例、积分系数	$k_{p4}=0.2, k_{i4}=20$
	电流内环 d 轴比例、积分系数	$k_{p5}=0.6, k_{i5}=2.5$
	电流内环 q 轴比例、积分系数	$k_{p6}=0.6, k_{i6}=2.5$
PLL	锁相环比例、积分系数	$k_{p_pll}=5, k_{i_pll}=0.11$

表3 VSC-HVDC 系统参数

Tab. 3 Parameters of the VSC-HVDC system

模块	参数	取值
交流侧参数	滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	5
	相电抗器 $C_f/\mu\text{F}$	0.015
直流侧参数	直流线路等效电阻 R_{dc}/Ω	0.009 64
	直流线路等效电感 L_{dc}/H	0.848 9
	直流侧电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	0.006 83

表4 VSC-HVDC 系统整流站参数

Tab. 4 Parameters of the VSC-HVDC system converter controller

模块	含义	取值
整流器控制参数	定交流电压控制外环	$k_{p9}=0.002\ 9, k_{p10}=0.002\ 9$
	定交流电压控制内环	$k_{p7}=2.5, k_{p8}=2.5$ $k_{i7}=10\ 000, k_{i8}=10\ 000$

整流站交流侧系统频率。

(2) VSC-HVDC直流系统动态方程

$$\begin{cases} \frac{di_{dc}}{dt} = \frac{1}{L_{dc}}(-u_{dc1} - R_{dc}i_{dc} + u_{dc}) \\ C_{dc}u_{dc1} \frac{du_{dc1}}{dt} = u_{dc1}i_{dc} - \frac{3}{2}(u_{d2}i_{ds1} + u_{q2}i_{qs1}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, u_{dc1} 和 i_{dc} 分别为VSC直流电压和电流; R_{dc} 、 L_{dc} 和 C_{dc} 分别为VSC直流侧线路电阻、电感和电容; u_{dc} 为恒定直流电压源。

(3) VSC-HVDC送端换流器动态方程

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{dt} = i_{ds1ref} - i_{ds1} \\ \frac{dy_2}{dt} = i_{qs1ref} - i_{qs1} \\ i_{ds1ref} = k_{p9}(u_{ds1ref} - u_{ds1}) + i_{d1} - \omega_g C_{fl} u_{qs1} \\ i_{qs1ref} = k_{p10}(u_{qs1ref} - u_{qs1}) + i_{q1} + \omega_g C_{fl} u_{ds1} \\ u_{d1} = u_{ds1} - \omega_g L_{cl} i_{qs1} + k_{p7}(i_{ds1ref} - i_{ds1}) + k_{i7} x_7 \\ u_{q1} = u_{qs1} + \omega_g L_{cl} i_{ds1} + k_{p8}(i_{qs1ref} - i_{qs1}) + k_{i8} x_8 \end{cases} \quad (11)$$

式中, y_1 、 y_2 为引入的中间变量; u_{d1} 和 u_{q1} 分别为VSC-HVDC整流站出口处交流电压的 d 、 q 轴分量。

工况改变后系统主要振荡模式见表5。

表5 工况改变后系统主要振荡模式
Tab. 5 Main system oscillation modes

振荡模式	特征值	振荡频率/Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	$2.448 \pm j91.74$	14.601 3	-0.026 7
$\lambda_{3,4}$	$-68.327 \pm j678.99$	108.064 3	0.100 1
$\lambda_{5,6}$	$-69.658 \pm j683.82$	108.833 1	0.101 3
$\lambda_{7,8}$	$-21.97 \pm j591.02$	94.064 0	0.037 2

1.3 VSC-HVDC系统数学模型

VSC-HVDC风电场侧整流站系统拓扑及控制系统结构如图5所示,VSC-HVDC风电场侧整流站直接与风电场相连,控制并网点PCC处交流电压和幅值;整流站控制系统外环采用定交流电压 d 、 q 轴解耦控制,内环电流采用PI控制。受端逆变电站以恒定直流电压源等效替代。

图5中, u_{ds1} 、 u_{qs1} 为整流站交流侧端口电压 d 轴和 q 轴分量; i_{ds1} 、 i_{qs1} 为VSC交流输电线路电流 d 轴和 q 轴分量; i_{d1} 、 i_{q1} 为并网输电线路电流的 d 轴和 q 轴分量; u_{d1} 和 u_{q1} 为VSC-HVDC整流站交

流侧桥臂电压 d 轴和 q 轴分量; L_{cl} 为相电抗; C_{fl} 为滤波电容。

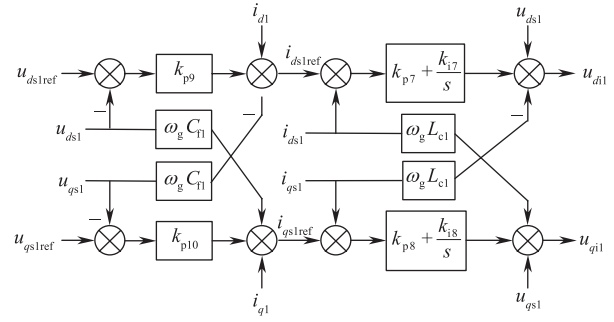


图5 VSC-HVDC 控制结构

Fig. 5 Control structure of VSC-HVDC

1.4 全系统线性化状态空间模型

联立1.1~1.2节所建立的直驱风力发电系统、VSC-HVDC系统数学模型,消去中间变量,线性化分解后得到整个系统小信号状态空间模型如式(12)所示,进而求解系统的特征根,分析系统稳定性。

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X + B\Delta U \quad (12)$$

式中, A 为状态矩阵; B 为输入矩阵; X 为状态变量; U 为控制输入变量。

其中, $\Delta X = [i_{ds}, i_{qs}, \omega, w_1, w_2, w_3, x_1, x_2, x_3, x_a, x_b, i_{dg}, i_{qg}, u_{dg}, u_{qg}, i_{di}, i_{qi}, u_{DC}, i_{ds1}, i_{qs1}, u_{ds1}, u_{qs1}, i_{dc}, u_{dc1}, y_1, y_2]^T$, 共含有26个状态变量,其中前18个表示直驱发电场系统的状态变量,后8个表示VSC-HVDC系统的状态变量。 $\Delta U = [w_{sref}, i_{dsref}, u_{DCref}, i_{qgref}, u_{ds1ref}, u_{qs1ref}, u_1, u_2, u_{dc}, \omega_g]^T$, 共含有10个输入变量。通过模型线性化后,可得到 26×26 阶 A 矩阵。

2 DDWFBVH并网系统振荡模式分析

在DDWFBVH并网系统线性化状态空间模型的基础上,本节通过求解系统特征值分析系统主要振荡模式,通过参与因子分析出振荡模态的强相关变量。

2.1 特征值分析

直驱风电场由多台直驱风机等效聚合而成,

风速为8 m/s，桨距角 b 为0，处于最大功率追踪运行方式下。每台风机输出功率相等，通过接入的风机台数调节风电场的输出功率。MSC的 d 轴参考电流设为0；GSC的直流电压参考值设为5， q 轴参考电流为0；VSC-HVDC整流站的给定频率为50 Hz。对系统进行特征值求解，得到系统振荡模式的特征值、振荡频率和阻尼比，结果见表6。

表 6 系统主要振荡模式
Tab. 6 Main system oscillation modes

振荡模式	特征值	振荡频率 /Hz	阻尼比
$\lambda_{1,2}$	$-2.93 \pm j40.85$	6.502 2	0.071 6
$\lambda_{3,4}$	$-68.327 \pm j678.99$	108.064 3	0.100 1
$\lambda_{5,6}$	$-69.658 \pm j683.82$	108.833 1	0.101 3
$\lambda_{7,8}$	$-21.97 \pm j591.02$	94.064 0	0.037 2

由表6可知，系统存在4个振荡模式，分别为1个SSO模式和3个中频振荡模式。上述4个振荡模式特征值实部均为负，表明当前工况下系统处于稳定状态。本文主要针对次同步振荡模式展开研究。

2.2 参与因子分析

本节进一步求解各振荡模式的参与因子，筛选出振荡模式的主要参与变量，从而反映出振荡模式与主导子系统间的相关性，所给数据均是参与因子归一化的模，结果如图6所示。

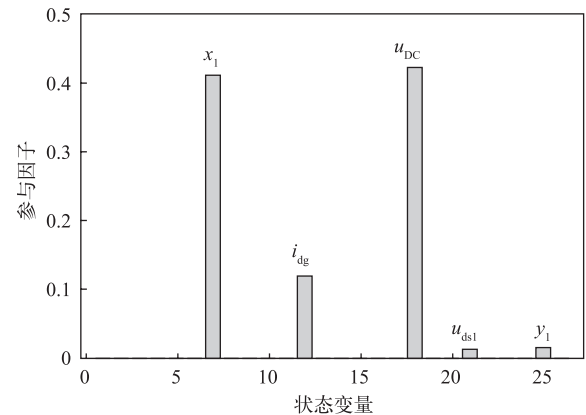


图 6 次同步振荡模式参与因子分析
Fig. 6 Participation factors analysis of SSO modes

$\lambda_{1,2}$ 由 x_1 、 i_{dg} 、 u_{DC} 、 u_{ds1} 和 y_1 主导参与，其振荡频率约为6 Hz，表明 $\lambda_{1,2}$ 模式是由直驱风电场

系统与柔性直流输电系统交互作用引发的SSO。直驱风电场与柔性直流输电系统间发生动态交互，使得直驱风机在次同步频段呈现负阻尼特性，满足振荡特性，从而引发SSO。状态变量 x_1 、 i_{dg} 和 u_{DC} 与风机网侧换流器密切相关，在次同步振荡模式中具有较高的参与度，状态变量 u_{ds1} 、 y_1 与VSC-HVDC系统相关，参与度较低。

2.3 时域仿真验证

设置仿真总时长为7 s，在2 s时，将GSC电压外环积分系数 k_{i4} 由20提高到400，观察直驱风电场输出的有功功率 P_g 的仿真波形。有功功率 P_g 的仿真波形和频谱分析结果如图7所示，本文所有有功功率仿真图均采用标么值。

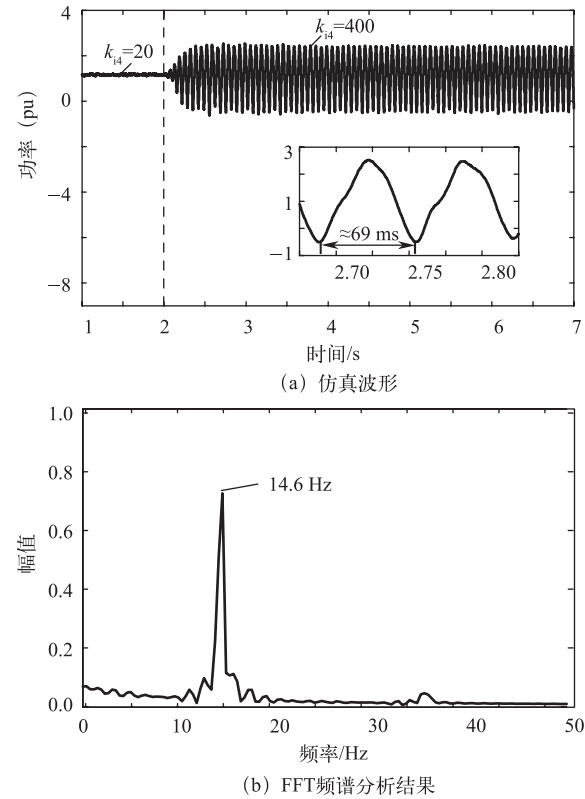


图 7 直驱风电场输出有功功率 P_g 仿真波形和频谱分析
Fig. 7 Simulation scope and spectrum analysis of the P_g

由图7可知，当 k_{i4} 增加后，有功功率 P_g 迅速振荡发散，随后出现持续等幅振荡，振荡频率为14.6 Hz。时域仿真的频谱分析结果与特征值分析结果一致，验证了系统主要振荡模式及参与因子分析的正确性。

3 DDWFBVH并网系统次同步振荡特性分析

3.1 风电并网距离对次同步振荡影响

为研究直驱风电场与柔直整流站间风电并网距离对系统次同步振荡模式特性的影响,逐渐改变风电并网线路参数,由标值的0.1倍增大到5倍,同时保持系统其他参数不变,特征根变化轨迹如图8所示。随着风电并网距离的增加,次同步振荡模式阻尼减小,振荡频率几乎不变。

文献[20]指出直驱风机在SSO/SupSO频段内可能呈现容性负阻尼特性,在接入弱电网时,容性负阻尼的风机与感性弱电网交互作用,阻抗幅值相等时相位裕度不足,系统存在振荡风险。对于DDWFBVH系统,风电并网距离增加时,电网等效电感增加,风电并网点电网强度降低,从而引发次同步振荡。因此,对于大规模可再生能源并网外送问题,建议缩短交流线路长度就近并网。

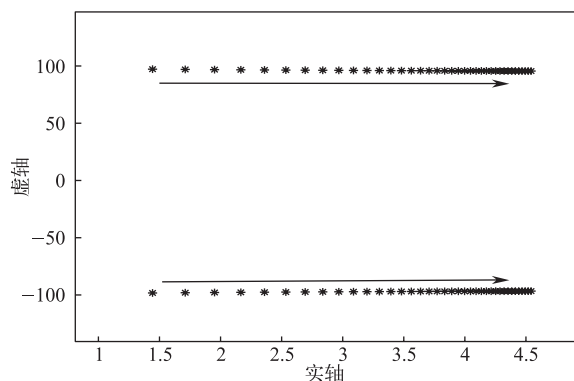


图8 风电并网距离变化时系统振荡模式的根轨迹图

Fig. 8 Root locus of system oscillation modes as AC line length varies

3.2 控制器参数对次同步振荡影响

3.2.1 GSC 控制器电压外环比例系数 k_{p4}

为研究直驱风电场GSC控制器电压外环比例系数 k_{p4} 对系统次同步振荡特性的影响,逐渐将 k_{p4} 由标况值的0.1倍增大到5倍,同时保持系统其他参数不变,系统特征根变化轨迹如图9所示。

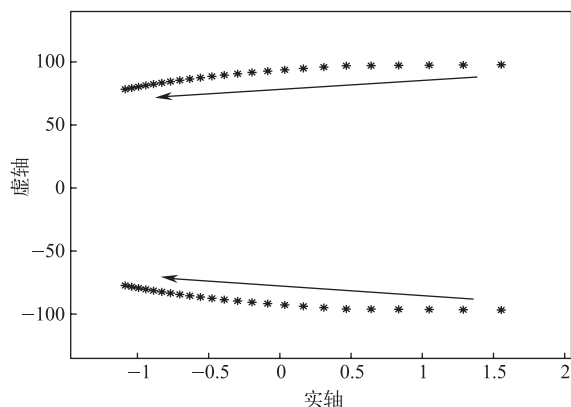


图9 k_{p4} 变化时系统振荡模式的根轨迹图

Fig. 9 Root locus diagram of the system oscillation modes as k_{p4} varies

由图9可知,随着 k_{p4} 的增加,特征值由复平面的右半平面逐渐移动到左半平面,阻尼增大,振荡频率略有减小,系统稳定性增强。

进行时域仿真验证上述分析的正确性,设置GSC控制器电流环比比例系数 k_{p4} 分别为标况值的0.1倍和2倍,仿真条件与3.1节相同。观察直驱风电场输出有功功率 P_1 的时域仿真曲线,如图10所示。由仿真结果可知,随着 k_{p4} 的增加,有功功率 P_1 仿真波形振荡发散速率变慢,振幅变小,阻尼增大,系统稳定性增强,时域仿真结果与特征值分析结果一致。

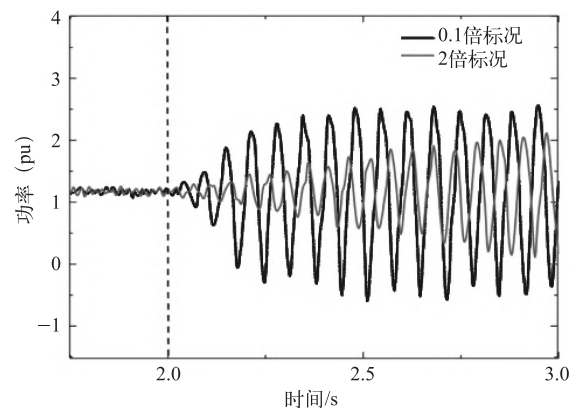


图10 不同 k_{p4} 下直驱风电场输出有功功率波形图

Fig. 10 Waveform of the direct-drive wind farm output active power P_1 under different k_{p4}

3.2.2 GSC 控制器电压外环积分系数 k_{i4}

为研究直驱风电场GSC控制器电压外环积分系数 k_{i4} 对系统次同步振荡特性的影响,逐渐将 k_{i4}

由标况值的0.01倍增大到4倍,同时保持系统其他参数不变,系统特征根变化轨迹如图11所示。

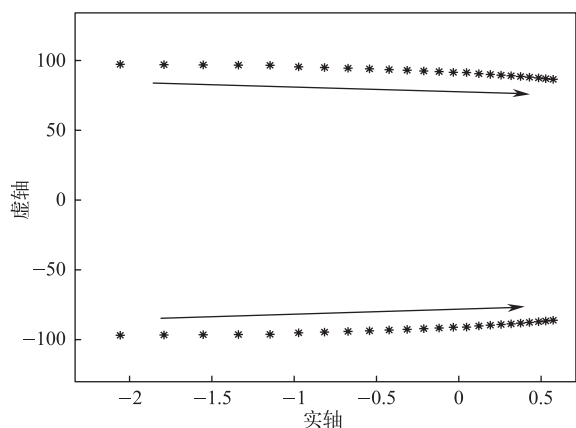


图 11 k_{i4} 变化时系统振荡模式的根轨迹图

Fig. 11 Root locus diagram of the system oscillation modes as k_{i4} varies

由图11可知,随着 k_{i4} 的增加,特征值由左半平面逐渐移动到右半平面,阻尼减小,振荡频率略有减小。

进行时域仿真验证上述分析的正确性,在 $t=2$ s时,设置GSC控制器电压外环积分系数 k_{i4} 分别为标况值的2倍和4倍,使风电并网系统发生振荡。观察有功功率 P_1 的时域仿真曲线,如图12所示。由仿真结果可知,随着 k_{i4} 的增加,有功功率 P_1 仿真波形发散速率变快,振幅变大,阻尼减小,系统稳定性减弱,时域仿真结果与特征值分析结果一致。

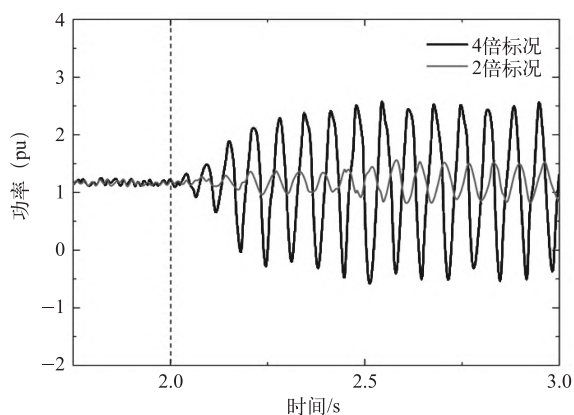


图 12 不同 k_{i4} 下直驱风电场输出有功功率波形图

Fig. 12 Waveform of the direct-drive wind farm output active power under different k_{i4}

4 结束语

本文建立了DDWFBVH并网系统等效模型,通过特征值分析和参与因子分析,研究了并网系统的次同步振荡特性。主要工作及研究结论为:

1) 建立了26阶DDWFBVH并网系统的线性化状态空间模型。

2) 风电并网距离对次同步振荡模式影响较大,对于DDWFBVH系统,风电并网距离增加时,电网等效电感增加,风电并网点电网强度降低,引发次同步振荡。因此,对于大规模可再生能源并网外送问题,建议缩短交流线路长度就近并网。

3) 控制器的PI参数影响直驱风电场与柔直系统交互作用的次同步振荡,控制器比例积分参数变化可以提高或者降低次同步振荡模态阻尼影响次同步振荡特性。因此,可以通过优化PI控制参数改善系统稳定性。

参考文献

- [1] 迟永宁,梁伟,张占奎,等.大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3758-3771.
- [2] 梁旭明,张平,常勇.高压直流输电技术现状及发展前景[J].电网技术,2012,36(4):1-9.
- [3] LI Yunfeng, TANG Guamgf, GE Jun, et al. Modeling and damping control of modular multilevel converter based DC grid[J]. IEEE Transactions on Power systems, 2018, 33(1): 723-735.
- [4] 高本锋,徐坤,肖湘宁,等.VSC-HVDC抑制串补引发的次同步振荡研究[J].华东电力,2011,39(4):556-560.
- [5] 李云丰,汤广福,贺之渊,等.MMC型直流输电系统阻尼控制策略研究[J].中国电机工程学报,2016,36(20):5492-5503.
- [6] 魏伟,许树楷,李岩,等.南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J].南方电网技术,2015,9(1):73-77.
- [7] AMIN M, MOLINAS M. Understanding the origin

- of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 378-392.
- [8] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 采用VSC-HVDC并网的直驱风电场次/超同步振荡特性[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 44-51.
- [9] 郭贤珊, 李云丰, 谢欣涛, 等. 直驱风电场经柔直并网诱发的次同步振荡特性[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1149-1160, 1407.
- [10] 杨悦, 李国庆. 基于VSC-HVDC的海上风电小干扰稳定控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 101-110.
- [11] WANG Li, YANG Zhihao, LU Xiuyu, et al. Stability analysis of a hybrid multi-infeed HVDC system connected between two offshore wind farms and two power grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 1824-1833.
- [12] KUNJUMHAMMD L P, PAL B C, OATES C, et al. Electrical oscillations in wind farm systems: analysis and insight based on detailed modeling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 51-61.
- [13] 黄碧月. 直驱风电并网的电力系统动态特性分析与次同步振荡研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [14] 崔意婵. 直驱风电场并网的次同步振荡特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [15] 郝亚峰. 弱电网下直驱风电场并网引发次同步振荡问题分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
- [16] 张明远, 肖仕武, 田恬, 等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2768-2777.
- [17] 杨志超. 直驱风机经弱交流系统并网的次同步振荡问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [18] 崔晓丹, 吴家龙, 王希, 等. 适用于次同步振荡研究的直驱风电场等值建模[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 148-157.
- [19] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [20] 李光辉, 王伟胜, 刘纯, 等. 直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一): 宽频带阻抗特性与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6547-6562.

作者简介

王福建 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析。

汤季宇 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析。

(收稿日期: 2023-03-16)