

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201546

风电场引发火电机组次同步振荡的机理及影响因素研究

徐衍会, 耿雨柔, 杨博文

(华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 风能资源的大规模开发利用是实现能源转型升级的必然途径。然而, 大规模风电场并网稳定性问题逐渐凸显, 实际系统中出现了风电场引发火电机组次同步振荡现象。建立了风火联合外送系统模型, 应用谐波响应法和复转矩系数法分析了风电场引发火电机组次同步振荡的机理。在此基础上, 分析了火电机组轴系扭振特性、风电场容量、风速、风机转子侧变频器内环增益系数以及风电场至火电机组的电气距离对次同步振荡的影响。结果表明, 轴系扭振模态可观测度越高、风电场容量越大、风机风速越高、风机转子侧变频器内环增益系数越大以及风电场与火电机组的电气距离越远, 火电机组次同步振荡越剧烈。通过 IEEE 第一基准模型和 IEEE39 节点系统的时域仿真验证了上述结论的有效性。

关键词: 风电场; 火电机组; 次同步振荡; 轴系扭振模态

Study on the mechanism and influencing factors of subsynchronous oscillations induced by wind farms in a fossil fuel power plant

XU Yanhui, GENG Yurou, YANG Bowen

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Large-scale development and utilization of wind energy is a significant way to achieve energy transformation and upgrading. However, the stability of large-scale wind farms connected to the grid has become an increasing problem. In an actual system, wind farms cause Sub-Synchronous Oscillation (SSO) of thermal power units. This paper establishes a model of a wind farm and thermal power unit combined delivery system. It applies the harmonic response method and the complex torque coefficient method to analyze the mechanism of SSO induced by wind farms in a fossil fuel power plant. Influencing factors on SSO such as the torsional vibration characteristics of the shafts, the capacity of the wind farm, the wind speed, the gain coefficient of inner current loop of RSC and the electrical distance from the wind farm to the thermal power unit are analyzed. The results show that the higher the observability of the torsional vibration mode of the shaft system, the larger the wind farm capacity, the higher the fan speed, the larger the gain coefficient of inner current loop of RSC and the farther the electric distance between the wind farm and the thermal power unit, the more severe SSO of the thermal power unit. The validity of the above conclusion is verified by time domain simulation of the first IEEE standard model and the IEEE39-bus system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51677066).

Key words: wind farm; thermal power unit; subsynchronous oscillation; shaft torsional vibration mode

0 引言

近年来, 风力发电发展非常迅速, 装机容量占比不断增长, 伴随而来的风电场并网稳定性问题逐渐凸显。2009年美国德州的一座风电场与串补输电线路相互作用引发了次同步振荡^[1], 造成风机设备

损坏。2015年, 我国新疆哈密地区出现了风电场产生的次同步频率谐波经多电压级网络传播, 引起火电机组次同步振荡, 造成轴系扭振切机事件^[2-3]。

由于风电利用小时数不高, 为了提高输电通道的利用率, 风火打捆联合外送成为一种普遍的模式。文献[4]使用特征值法对双馈风机接入 SSR 第一标准模型系统进行分析, 结果表明在风机并网后, 火电机组的次同步振荡模式阻尼比降低。文献[5]以风

火打捆经串补外送系统为研究对象，通过建立火电机组转速与双馈风电场输出功率之间的传递函数，进而得出了风电场功率调节对系统阻尼的影响。文献[6]使用特征值法与时域仿真法，分析了双馈风机并网对火电机组次同步振荡的影响，验证了风电容量、风速、风机控制参数对火电机组轴系模态阻尼的影响，指出系统稳定性会随着线路串补度降低而提高。文献[7-8]验证了 STATCOM 对系统次同步振荡的抑制效果。文献[9-10]提出了一种改进的次同步振荡检测方法。文献[11-14]提出了基于风机变频器附加阻尼控制的次同步振荡抑制方法，并进行了时域仿真验证。文献[15]分析了风火打捆直连送出系统中次同步振荡的传播特性。上述文献研究了风电场并网对火电机组小干扰稳定性的影响，取得了较为丰富的成果。但是研究中没有充分考虑火电机组轴系扭振特性、风电场至火电机组电气距离等因素对火电机组次同步振荡的影响。

本文以风火联合外送系统为研究对象，应用谐波响应法和复转矩系数法分析风电场引发火电机组次同步振荡的机理，基于 IEEE 第一基准模型建立双馈风电场和火电机组并联到无穷大电网的模型，利用时域仿真法验证了当火电机组轴系扭振频率与风电场次同步电流谐波互补且轴系扭振模态可观测度较高时，可以引发火电机组轴系扭振。分析了轴系扭振模态可观测度、风电场容量、风速、风机转子侧变频器内环增益系数和风电场与火电机组的电气距离对次同步振荡的具体影响。最后，基于 IEEE39 节点系统对上述分析进行了仿真验证。

1 风火联合外送系统模型

本文基于 IEEE 第一标准模型^[16]建立如图 1 所示的双馈风电场与火电机组联合外送系统模型。其中 G 表示包含了高中压缸 HIP、低压缸 LPA、低压缸 LPB、发电机 GEN 共 4 个轴段的汽轮发电机。DFIG 表示由多台双馈风机聚合而成的双馈风电场。

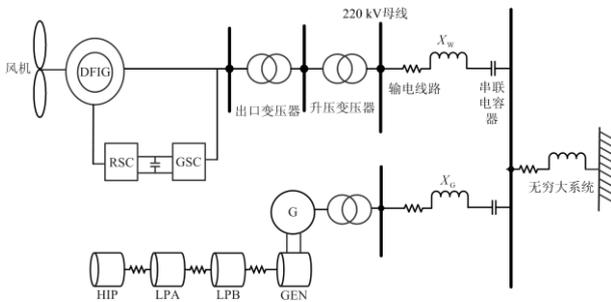


图 1 风火联合外送系统模型

Fig. 1 Model of the wind farm and the thermal power unit combined delivery system

1.1 火电机组模型

大型汽轮发电机组的转子是一个复杂的机械系统，包括一根细长的轴。在转子轴的不同轴段上分别安装有汽轮机叶轮和叶片、励磁绕组以及发电机转子铁芯等。通过不同轴段之间的相对角位移，实现了轴上转矩即扭矩的传递。

在研究机电耦合作用引起的轴系扭振问题时，需要考虑转子轴系弹性的影响，建立相应的轴系数学模型。本文采用轴系多质量块弹簧模型，每个轴段都等值为刚性的集中质量块，通过无质量的弹簧连接各个质量块，以模拟轴系各个轴段间的转矩传递关系，并得到如图 1 中所示汽轮发电机组轴系的分段集中质量弹簧模型。

可列出轴系方程^[17]为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\delta}_i = \Delta \omega_i \\ 2H_i \Delta \dot{\omega}_i = -\Delta T_{ei} - D_{ii} \Delta \dot{\omega}_i - \\ \quad K_{i,i+1} (\Delta \delta_i - \Delta \delta_{i+1}) - K_{i,i-1} (\Delta \delta_i - \Delta \delta_{i-1}) \\ i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\Delta \delta_i$ 为转子角位移； $\Delta \omega_i$ 为转子角速度增量； ΔT_{ei} 为电气转矩增量； H_i 为转子的惯性常数； D_{ii} 为转子自阻尼系数； $K_{i,i+1}$ 和 $K_{i,i-1}$ 为各个相邻集中质量块之间的弹性系数；汽轮机转子的电气转矩增量为零。

可以得到

$$\begin{cases} [M_4(p) - K_5(p)A_4(p)]\Delta \delta_4 = -\Delta T_e \\ M_i(p) = 2H_i p^2 + D_{ii} p + K_{i-1,i} + K_{i,i+1} \\ K_i(p) = K_{i,i+1} \end{cases} \quad (2)$$

式中， p 为微分算子， $p = d/dt$ 。

机组的机械复转矩系数^[18]为

$$K_M(p) = -\frac{K_{12}^2}{M_1(p)} + M_2(p) - \frac{K_{23}^2}{M_3(p) - \frac{K_{34}^2}{M_4(p)}}$$

其数值为零时对应的频率 f 即为轴系自然扭振频率。

将式(1)写成矩阵形式为 $(Mp^2 + Dp + K)\Delta \delta = \Delta T_m - \Delta T_e = \Delta T$ ，通过求取矩阵 $[M^{-1}K]$ 的特征值也可计算出火电机组轴系扭振频率。

1.2 风电机组模型

在目前大型风电场中，双馈风机得到了广泛使用，它的定子与电网相连，转子通过转换器连接到电网，交流励磁由电力电子变换器实现。变换器可双向流动，向转子提供励磁电流，转子也可以通过变频器向电网供电。由于定子和转子都与交流电网

相连, 称为双馈风机(DFIG)^[19-20]。本文采用如图 1 所示的双馈风机模型, 变频器包括转子侧变频器、直流电容与网侧变频器, 变频器可对转子绕组施加变频电流, 从而实现了风机的变速恒频运行^[21]。变频器模型由各类控制器组成, 形成双闭环控制结构, 转子侧变频器实现有功、无功解耦控制, 网侧变频器实现变频器内直流母线电压控制^[22]。

1.3 风电场引发火电机组次同步振荡的机理

在如图 1 所示的风火联合外送系统中, 设电网的同步频率分别为 f_n , 火电机组轴系的某轴系自然扭振频率为 f_m , 当风电场产生频率为 f_c 的次同步谐波时, 次同步谐波在电网中传播, 则作用在机组轴系的转矩振荡分量为 $f_n - f_c$, 当频率 $f_n - f_c$ 与 f_m 相等时, 则电气系统将会产生负阻尼振荡现象, f_m 所对应的主振型的振幅将逐渐增大, 导致转子机械疲劳积累或损伤, 严重时将造成机组大轴损坏的事故。各次谐波在风火联合外送系统中的传递过程如图 2 所示。

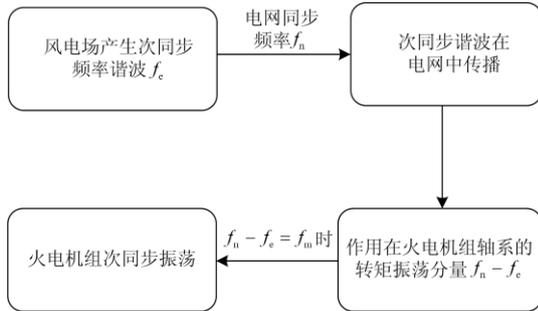


图 2 谐波在风火联合外送系统中的响应过程

Fig. 2 Response process of harmonics in the wind farm and the thermal power unit combined delivery system

火电机组机端电压用 E_G 表示, 双馈风机机端电压用 E_w 表示, U_A 表示双馈风电场并网处的母线电压。设 U_A 的相量角度为 0 , δ 与 θ 分别表示火电机组与双馈机组的机端电压相角。基于文献[5]与文献[17]的结论, 推导分析双馈风机的输出功率对火电机组次同步阻尼的影响, 火电机组的输出有功功率 P_G , 双馈风机的输出有功功率 P_w 以及无功功率 Q_w 可以表示为

$$\begin{cases} P_G = \frac{E_G U_A \sin \delta}{X_G} \\ P_w = \frac{E_w U_A \sin \theta}{X_w} \\ Q_w = \frac{E_w U_A \cos \theta}{X_w} - \frac{U_A^2}{X_w} \end{cases} \quad (3)$$

考虑电力系统有功无功的解耦特性, 有功功率对电压影响较小, 忽略双馈风机有功功率变化对其母线电压变化影响, 则

$$\Delta P_w = \frac{E_{w0} U_{A0} \cos \theta_0}{X_w} \Delta \theta \quad (4)$$

假设在火电机组轴系发生一个小扰动为 $\Delta \delta$, 其次同步频率为 ω_0 , 幅值为 H ; 由于风机无功功率波动, 风机接入点电压会相应改变, 其变化量记为 ΔU_A , 进行小扰动分析可得到

$$\Delta P_G = \frac{E_{G0} U_{A0} \cos \delta_0}{X_G} \Delta \delta + \frac{E_{G0} \sin \delta_0}{X_G} \Delta U_A \quad (5)$$

$$\Delta Q_w = -\frac{E_{w0} U_{A0} \sin \theta_0}{X_w} \Delta \theta - \frac{(E_{w0} \cos \theta_0 - 2U_{A0})}{X_w} \Delta U_A \quad (6)$$

从而可得

$$\Delta U_A = \frac{X_w}{2U_{A0} - E_{w0} \cos \theta_0} \Delta Q_w + \frac{2E_{w0} U_{A0} \sin \theta_0}{2U_{A0} - E_{w0} \cos \theta_0} \Delta \theta \quad (7)$$

式(7)中下标为 0 的量代表初始值。

将式(6)、式(7)代入式(5), 可以得到

$$\Delta P_G = \frac{E_{G0} U_{A0} \cos \delta_0}{X_G} \Delta \delta + k_p \Delta P_w + k_q \Delta Q_w \quad (8)$$

式中:

$$k_p = \frac{X_w}{X_G} \times \frac{E_{G0} U_{A0} \sin \delta_0 \tan \theta_0}{2U_{A0} - E_{w0} \cos \theta_0} \quad (9)$$

$$k_q = \frac{X_w}{X_G} \times \frac{E_{G0} \sin \delta_0}{2U_{A0} - E_{w0} \cos \theta_0} \quad (10)$$

那么当系统发生扰动频率为 ω_0 的次同步振荡时, 火电机组的电磁转矩增量 ΔT_e 为

$$\Delta T_e = \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{E_{G0} U_{A0} \cos \delta_0}{X_G} \Delta \delta + k_p \Delta P_w + k_q \Delta Q_w \right) \quad (11)$$

火电机组的一个附加电磁转矩增量 ΔT_w 由双馈风机输出功率变化量提供, 即

$$\Delta T_w = \frac{1}{\omega_0} (k_p \Delta P_w + k_q \Delta Q_w) \quad (12)$$

根据上述的分析推导, 双馈风机的输出功率可以为火电机组提供一定的阻尼转矩。根据图 3 中电磁转矩与转速偏差相量图, 当 ΔT_w 在第一、第二象限时起到正阻尼的作用, 如果 ΔT_w 与 ΔT_e 的合成相量 $\Delta T'_e$ 与 $\Delta \omega$ 的夹角小于 90° , 则火电机组的阻尼转矩为正值, 火电机组的次同步振荡得到抑制。当 $\Delta T'_e$ 与 $\Delta \omega$ 的夹角超过 90° , 即在第三或第四象限时, 会起到负阻尼作用。在风火联合外送系统中, 风机并网会进一步扩大火电机组的转子转速偏差, 且振荡

频率不变，加剧了次同步振荡。

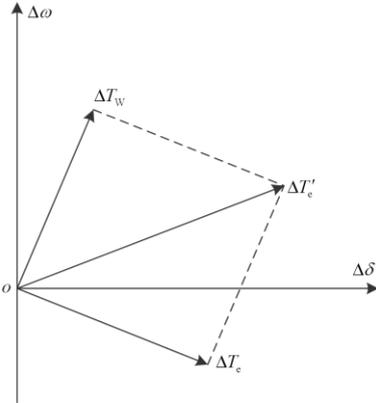


图 3 电磁转矩与转速偏差相量图

Fig. 3 Phasor diagram of electromagnetic torque and rotation speed deviation

2 风电场引发火电机组次同步振荡的影响因素研究

在 Matlab/Simulink 电磁暂态仿真软件中建立如图 1 所示的风火联合外送系统的电磁暂态模型。其中汽轮发电机的额定容量为 600 MW，风电场是由 10 台额定功率为 1.5 MW 双馈风电机组聚合而成，双馈风机的具体参数如表 1 所示。

表 1 双馈发电机参数

Table 1 Doubly fed generator parameters

双馈风电机参数名称	有名值/标么值
额定功率	1.5 MW
额定电压	575 V
额定频率	50 Hz
额定风速	15 m/s
定子电阻	0.023 p.u.
转子电阻	0.016 p.u.
定子漏电抗	0.18 p.u.
转子漏电抗	0.16 p.u.
定转子互感	2.90 p.u.
转子惯性时间常数	0.685 s
发电机阻尼系数	0.01 p.u.
极对数	3
初始电流和相角	0

本文采用时域仿真法与复转矩系数法^[23-24]结合进行分析。文献[25]对复转矩系数法的原理进行介绍，基于时域仿真，可以获得电气阻尼系数随频率变化的曲线。文献[26]介绍了复转矩系数法在多机系统中的适用性。本文中的风火联合外送系统符合其适用条件，因此可使用复转矩系数法进行研究分析。

基于上述建立的电磁暂态模型，在系统无串补的条件下，调整双馈风机转子侧与网侧变流器控制

参数，激发出风电场次同步振荡现象，风电场输出有功、无功功率的波形及频谱分析结果如图 4 所示。220 kV 母线与汽轮机出口 22 kV 母线处的电流波形、频谱分析结果如图 5、图 6 所示。根据频谱分析结果可以发现，双馈风机的输出无功功率含有 23.33 Hz 的次同步分量，220 kV 母线处电流与汽轮机出口 22 kV 母线电流中均含有 26.33 Hz 的次同步分量，但 220 kV 母线处电流次同步谐波比例较小。在系统中存在次同步电流谐波的情况下，火电机组发生了轴系扭振现象，发电机转速偏差以及频谱图如图 7 所示。

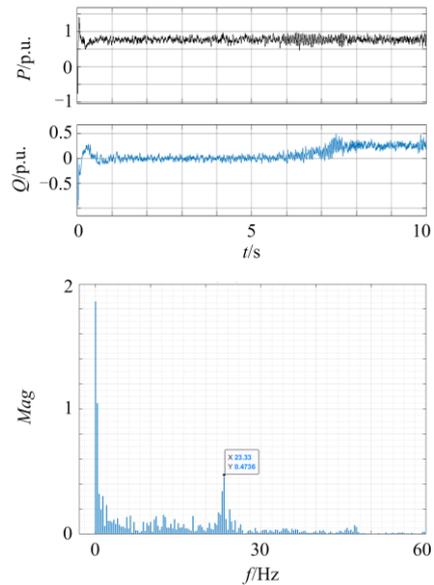


图 4 双馈风机输出功率波形及频谱图

Fig. 4 Output power waveform of DFIG and spectrum

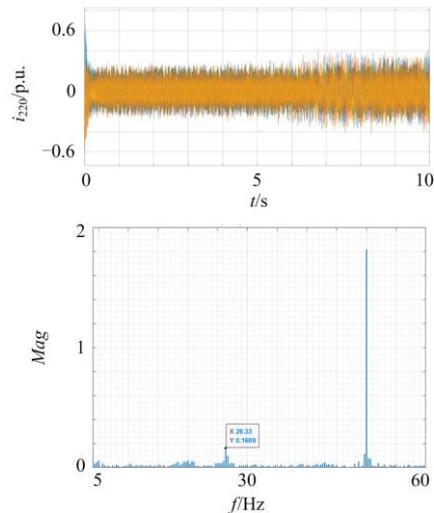


图 5 220 kV 母线处电流波形及频谱图

Fig. 5 Current waveform at 220 kV bus and spectrum

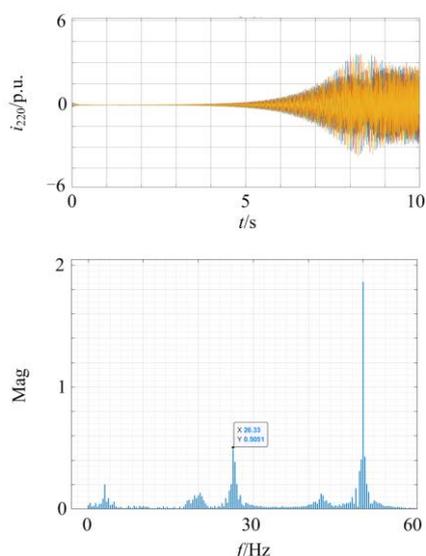


图6 汽轮机组出口 22 kV 母线处电流波形及频谱图

Fig. 6 Current waveform at 22 kV bus of turbine outlet and spectrogram

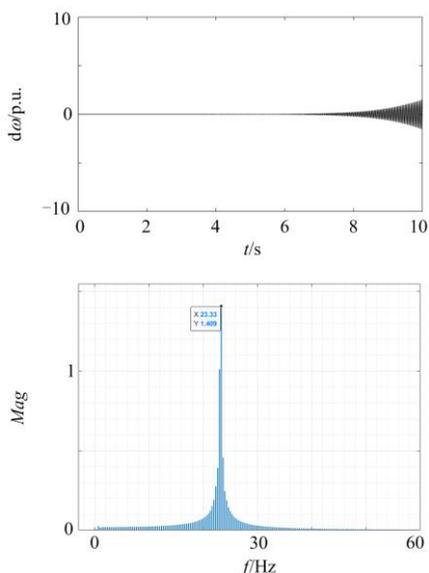


图7 汽轮机组轴系扭振波形及频谱图

Fig. 7 Torsional vibration waveform of steam turbine shafting and spectrogram

2.1 火电机组轴系扭振特性对次同步振荡的影响

应用复转矩系数法分析上述电磁暂态模型中火电机组轴系扭振特性如图8所示, 可以计算出机轴系扭振频率为 12.76 Hz、16.07 Hz、23.72 Hz。

为描述火电机组各模态可控与可观测的程度, 根据文献[27], 计算各模态的可控度与可观测度如表2所示。

从图5—图7的频谱分析结果可知, 火电机组的轴系扭振中包含多个频率分量, 对应其多个模态,

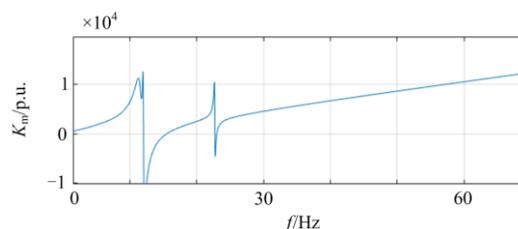


图8 复转矩系数法计算的轴系扭振自然频率

Fig. 8 Natural frequency of torsional vibration of shafting calculated by compound torque coefficient method

表2 次同步振荡的可观测度与可控度

Table 2 Observability and controllability degree of subsynchronous oscillations

模态	f_1	f_2	f_3
可控度	0.99	1	0.89
可观测度	0.65	0.05	1

然而频率为 23.33 Hz 对应模态 2 的分量幅值最大, 且远大于其他分量。根据表2中计算的各模态可观测度与可控度可知, 模态 3 的可观测度与可控度均较高。双馈风机输出功率里同样含有 23 Hz 的分量, 与火电机组转子轴系自然扭振的模态 3 频率基本一致。在双馈风机与火电机组的输出电流中, 也均含有相对互补的 26.33 Hz 分量。

采用复转矩系数法进行频率扫描, 可以得到在风机并网前后, 火电机组的电气阻尼曲线, 如图9所示。根据结果可知, 系统在 23 Hz 左右(转子侧频率)处出现了电气负阻尼最大值点, 因此在此处将会出现电气谐振现象。由于火电机组模态 3 频率(23.72 Hz)与该频率 23 Hz 相近, 故系统可能会发生模态 3 的次同步振荡现象。还可以发现, 在风机接入后, 火电机组在次同步频率段的阻尼被削弱, 加剧火电机组的次同步振荡, 出现轴系扭振现象, 与时域仿真结果相一致。

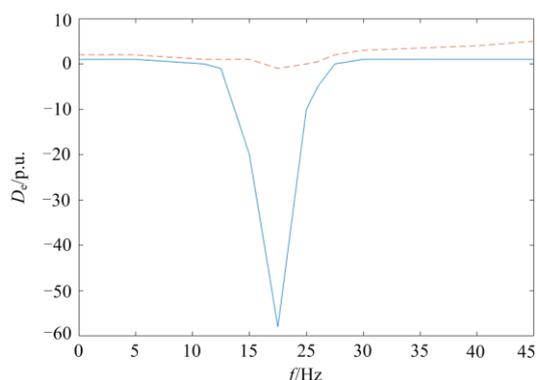


图9 风电场并网前后火电机组电气阻尼频率响应曲线

Fig. 9 Frequency response curve of electrical damping of thermal power units before and after wind farm grid connected

2.2 风电场容量对次同步振荡的影响

设定风速为 12 m/s，保持火电机组出力为 600 MW 不变，改变并网风机台数，使风电机组并网容量分别为 15 MW、75 MW、300 MW、600 MW，定义风火打捆比例为风电出力与火电出力之比，即风火打捆比例对应为 1:40、1:8、1:2、1:1，火电机组轴系扭振曲线如图 10 所示。随着风电机组并网容量的增加，火电机组转速偏差振荡幅值在逐渐增加，振荡发散程度加剧。

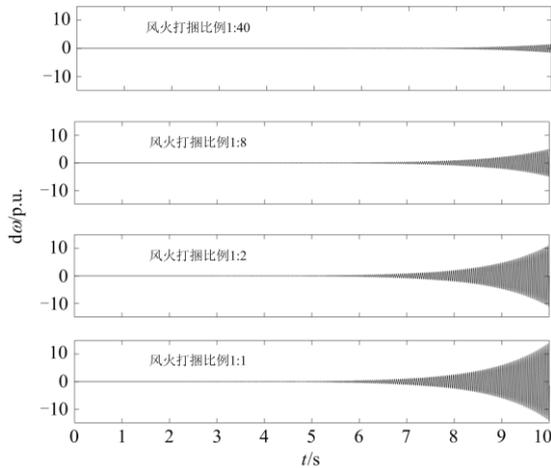


图 10 风电场容量对次同步振荡的影响

Fig. 10 Influence of wind farm capacity on SSO

2.3 风速对次同步振荡的影响

保持火电机组输出功率 600 MW 不变，设定并网风机台数为 200 台，风电场额定出力 300 MW。将风电场风速由 12 m/s 调节至 6 m/s，火力发电机转速偏差以及频谱图如图 11 所示，机组出现次同步振荡现象，且随着风速的降低，振荡程度在逐渐减小。

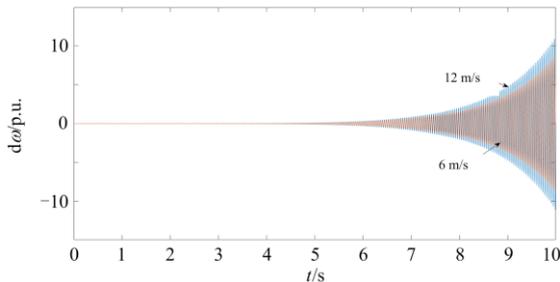


图 11 风速对次同步振荡的影响

Fig. 11 Influence of wind speed on SSO

2.4 风电场至火电机组的电气距离对次同步振荡的影响

设定风速为 12 m/s，风电场额定出力为 300 MW，风电场至火电机组的等值电感用 L_g 来表

示， L_g 减小时，火电机组轴系扭振曲线如图 12 所示。随着风电场至火电机组的电气距离减小，电网强度增大，火电机组的次同步振荡幅度在减弱。

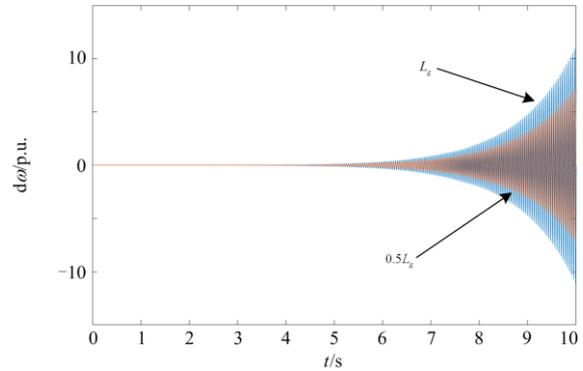


图 12 风电场至火电机组的电气距离对次同步振荡的影响

Fig. 12 Influence of the electric distance between the wind farm and the thermal power unit on SSO

2.5 风机控制器参数对次同步振荡的影响

设定风速为 12 m/s，风电场额定出力为 300 MW，风电场至火电机组的电气距离为初始值，仅改变风电机组转子侧变频器的电流内环 PI 控制参数 K_p ，火电机组轴系扭振曲线如图 13 所示。随着转子侧变频器内环增益系数增加，火电机组的次同步振荡幅度增加。

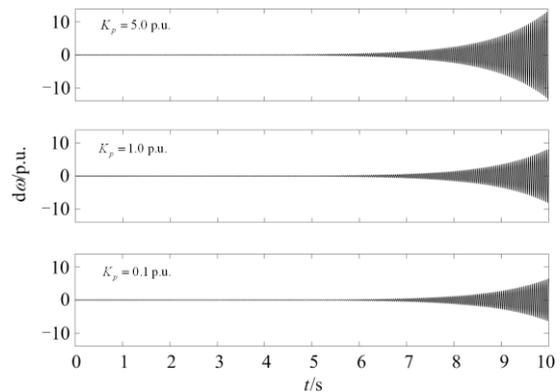


图 13 风机控制器参数对次同步振荡的影响

Fig. 13 Influence of the parameters of wind turbine controller on SSO

3 基于 IEEE39 节点系统的风火联合外送系统次同步振荡分析

基于 IEEE39 节点系统搭建如图 14 所示风火联合外送系统模型。该系统模型包含火电机组 9 台，风电场 1 座，风电场包含 200 台双馈风电机组，并经过箱式变压器(0.57 kV/35 kV)升压到 35 kV，再经过升压变压器(35 kV/220 kV)并入电网。

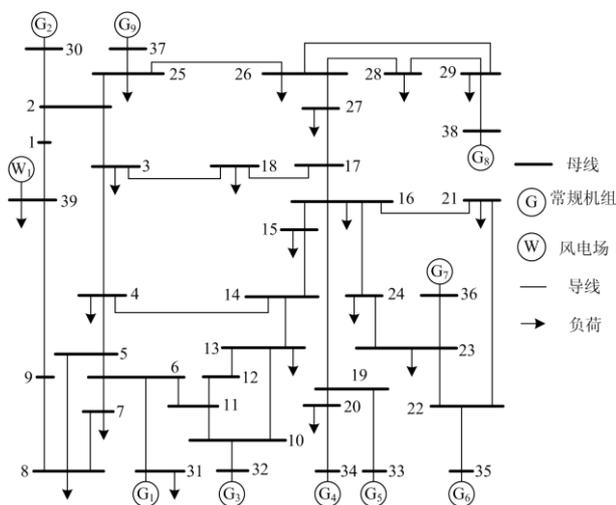


图 14 基于 IEEE39 节点系统的风火联合外送系统模型

Fig. 14 Model of combined wind and fire delivery system based on IEEE39 bus system

火电机组 1 轴系采用四质块模型, 具体参数与上文火电机组轴系参数一致, 自然扭振频率为 12.76 Hz、16.07 Hz、23.72 Hz, 其余 8 台火电机组的模型中不含有轴系模型。调节风速、风电场容量以及风机的控制参数, 激发出风电场 26 Hz 的次同步电流振荡谐波(功率振荡 23 Hz), 波形和振荡频率如图 15 所示。该电流振荡频率与火电机组 1 轴系模式 3 固有扭振频率恰好互补, 激发如图 16 所示的火电机组 1 的次同步振荡现象, 其余火电机组因不含有轴系模型, 而没有参与次同步振荡。

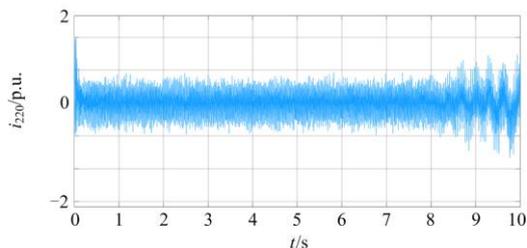


图 15 激发出的风电场次同步振荡电流波形

Fig. 15 Subsynchronous oscillation current waveform of wind farm with wind farm and thermal power plant

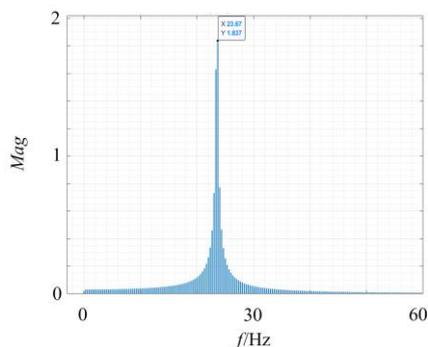
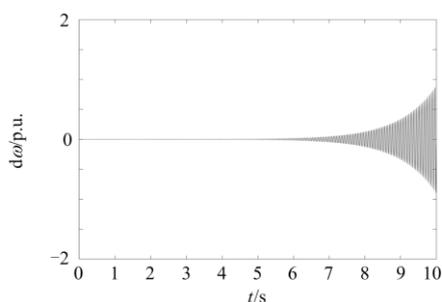


图 16 火电机组轴系扭振波形及频谱图

Fig. 16 Torsional vibration waveform of steam turbine shafting and spectrogram

为研究双馈风电场的并网位置对火电机组次同步振荡特性的影响, 设置风电场分别通过母线 32 与母线 34 并网, 观察不同情况下火电机组 1 的轴系扭振波形, 如图 17 所示。

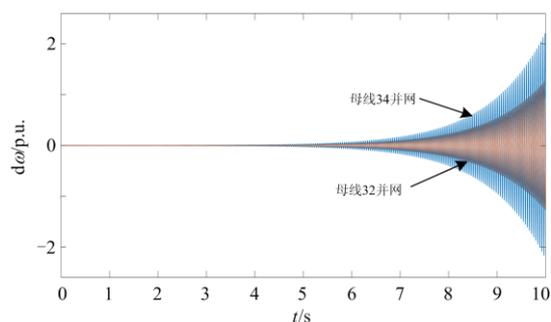


图 17 风电场不同并网位置下火电机组轴系扭振波形

Fig. 17 Torsional vibration waveform of steam turbine shafting under different grid connected positions of wind farm

电气距离用来衡量系统节点之间电气联系的紧密程度, 系统节点的电气参数相互之间影响较大的则电气距离小, 反之则电气距离较大, 本文以文献 [28] 定义的联系阻抗来描述两节点之间的电气距离, 如式(13)所示。

$$Z_{ij,in} = Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} \quad (13)$$

式中: Z_{ij} 为节点 i 与 j 的互阻抗; Z_{ii} 、 Z_{jj} 为节点组阻抗阵中节点 i 与节点 j 的自阻抗。

计算节点 31 和节点 32、34 之间的联系电抗值, 得到 $X_{31,32} = 0.0532$ 、 $X_{31,34} = 0.0977$, 即风电场在母线 32 并网时, 与火电机组 1 的电气距离比在母线 34 并网时相对较小。即风电场与火电机组的电气距离减小, 火电机组的次同步振荡频率不变, 振荡幅度减弱。

可以验证, 当系统中的火电机组轴系自然扭振

频率与风电场电流振荡频率精确互补,且对应模态可观测度与可控度较高时,电气振荡分量会和火电机组轴系相互作用,引发火电机组次同步振荡现象。当风电场并网位置不同时,火电机组次同步振荡程度不同。

4 结论

本文针对双馈风电场与火电机组接入交流电网的系统开展了研究,分析了双馈风电场引发火电机组次同步振荡的机理,得到的主要结论如下:

1) 使用谐波响应法和复转矩系数法进行推导与分析,双馈风机并网在一定程度上会削弱火电机组的电气阻尼,加剧火电机组轴系扭振。

2) 通过改变风电场容量、风速、风机转子侧变频器内环增益系数以及风电场至火电机组的电气距离,观察双馈风电场并网对次同步相互作用的影响,发现提高风电场容量、风机风速、风机转子侧变频器内环增益系数以及增加风电场与火电机组的电气距离,均会进一步增强火电机组次同步振荡剧烈程度。

3) 基于 IEEE39 节点系统模型,激发出风电场某特定频率的次同步振荡电流。验证了当风电场并网位置不同时,对火电机组轴系次同步振荡的影响。

本文后续将研究永磁直驱风机并网对火电机组次同步振荡特性的影响,结合实际风火打捆外送系统,提出能够有效抑制风火打捆系统次同步振荡并且具有较强工程实用性的措施,如改变风电接入比例,送端系统强度以及在风机控制器中增加附加阻尼控制等。

参考文献

- [1] ADAMS J, PAPPU V A, DIXIT A. Ercot experience screening for sub-synchronous control interaction in the vicinity of series capacitor banks[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, USA.
- [2] 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 on complex oscillation caused by new energy grid connected system and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [3] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828.
- [4] 陈耀君. 含双馈风电场系统的次同步振荡特性及抑制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
CHEN Yaojun. Studies on characteristic and suppressing strategies of subsynchronous oscillation with DFIG-based wind farms[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [5] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场抑制系统次同步振荡分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1613-1620.
LI Hui, CHEN Yaojun, ZHAO Bin, et al. Analysis and control strategy of subsynchronous oscillation suppression in doubly fed wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1613-1620.
- [6] LI Jing, ZHANG Xiaoping. Impact of increased wind power generation on subsynchronous resonance of turbine-generator units[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2016, 4(2): 219-228.
- [7] 张育硕, 郝丽丽, 周彦彤, 等. 风火打捆经串补外送系统次同步振荡分析及抑制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(6): 189-195.
ZHANG Yushuo, HAO Lili, ZHOU Yantong, et al. Analysis and suppression strategy of subsynchronous oscillation in wind and fire bundled transmission system through series compensation[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 189-195.
- [8] PADIYAR K R, PRABHU N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1398-1405.
- [9] LI Hui, ABDEEN M, CHAI Zhaosen, et al. An improved fast detection method on subsynchronous resonance in a wind power system with a Series compensated transmission line[J]. IEEE Access, 2019, 7: 61512-61522.
- [10] QI Yuan, LI Jiaxian, LIU Hao, et al. Subsynchronous oscillation monitoring and alarm method based on phasor measurements[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 464-474.
- [11] 李忍. 风光火多源并网系统次同步振荡分析与抑制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
LI Ren. Sub synchronous oscillation analysis and suppression of grid-connected multi-source systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [12] 吴杨. 风火打捆经串补外送系统次同步振荡分析与抑制[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
WU Yang. Analysis and suppression of subsynchronous oscillation in wind-fire bundling system with series compensation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.

- [13] FARIED S O, UNAL I, RAI D, et al. Utilizing DFIG-based wind farms for damping subsynchronous resonance in nearby turbine-generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 452-459.
- [14] ZHU X, SUN H, WEN J, et al. A practical method to construct network state equations in multi-machine system SSR study[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 107: 51-58.
- [15] 杨尉薇, 朱玲, 李威, 等. 风火打捆直流送出系统次同步振荡及传播特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 58-64.
- YANG Weiwei, ZHU Ling, LI Wei, et al. Study on subsynchronous oscillation and propagation characteristics of wind-fire bundled sending system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 58-64.
- [16] IEEE Torsional Issues Working Group. First benchmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1977, 96(5): 1565-1572.
- [17] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- XU Zheng. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4.
- [19] 单碧涵, 王宝华, 刘洋, 等. 基于定子侧模拟电阻的双馈风电场次同步振荡抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 10-16.
- SHAN Bihan, WANG Baohua, LIU Yang, et al. Analysis of a new control strategy based on stator-side virtual resistance to suppress sub-synchronous oscillation in DFIG-based wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 10-16.
- [20] 王潇, 刘辉, 邓晓洋, 等. 双馈风电场经柔性直流并网系统的宽频带振荡机理分析与风险评估[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 238-247.
- WANG Xiao, LIU Hui, DENG Xiaoyang, et al. Mechanism analysis and risk assessment of broadband resonance in doubly-fed induction generator-based wind farms integration through flexible HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 238-247.
- [21] 李辉, 陈耀君, 赵斌, 等. 双馈风电场阻尼系统次同步振荡的无功功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 19-25.
- LI Hui, CHEN Yaojun, ZHAO Bin, et al. Reactive power control strategy for subsynchronous oscillation of doubly fed wind farm damping system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 19-25.
- [22] TUMMALA A S L V. A robust composite wide area control of a DFIG wind energy system for damping inter-area oscillations[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 260-269. DOI: 10.1186/s41601-020-00170-y.
- [23] 刘俊, 孙惠文, 吴柳, 等. 电力系统暂态稳定性评估综述[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 44-53, 122.
- LIU Jun, SUN Huiwen, WU Liu, et al. Overview of transient stability assessment of power systems[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 44-53, 122.
- [24] HAMEFORS L. Proof and application of the positive-net-damping stability criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 481-482.
- [25] 张航, 滕予非, 王晓茹, 等. 计及并联补偿高抗的电力系统对次同步振荡的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 25-34.
- ZHANG Hang, TENG Yufei, WANG Xiaoru, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of power system with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 25-34.
- [26] 王晋. 复转矩系数法及次同步振荡阻尼特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- WANG Jin. Research on complex torque coefficient approach and subsynchronous oscillation damping characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [27] 徐衍会. 基于可观测与可控度的直流输电次同步振荡阻尼控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 21-26.
- XU Yanhui. Research on HVDC subsynchronous damping control based on observability and controllability degree[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 21-26.
- [28] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
-
- 收稿日期: 2020-12-13; 修回日期: 2021-05-05
- 作者简介:
- 徐衍会(1978—), 男, 通信作者, 博士, 博士生导师, 研究方向为动态电力系统分析与负荷建模; E-mail: xuyanhui23@sohu.com
- 耿雨柔(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网的稳定性分析; E-mail: gengyurou@163.com
- 杨博文(2000—), 男, 本科生, 研究方向为新能源电力系统分析。E-mail: 18811538677@139.com
- (编辑 周金梅)