

基于能流功率变化率的双馈风电场内次同步振荡源定位

曹娜, 潘宏一, 郭嘉奇, 于群

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:在对实际风电场内次同步振荡源定位时,不仅要考虑机组控制参数对其能流功率的影响,还要考虑风速、风力机的塔影效应和风剪切等运行参数的影响。为此以双馈风电场为例,分析机组控制参数、风速、塔影效应、风剪切等运行参数变化对双馈风电机组及其子系统能流功率的影响规律;推导并定义双馈风电机组及其各子系统能流功率变化率;提出以机组能流功率变化率大于0作为风电场内次同步振荡源定位的判据;在PSCAD/EMTDC仿真平台上建立了双馈风电场模型,通过仿真分析验证所提风电场内次同步振荡源定位判据合理性。

关键词:运行参数;风电场;能流功率变化率;次同步振荡源;判据

中图分类号:TM712;TM315

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202506027

0 引言

大量风电机组并网给电力系统的稳定运行带来了新的挑战。比如,并网风电场发生多起次同步振荡事件,造成大量机组连锁脱网及系统中发电设备的损坏,严重影响了系统的正常运行^[1-4]。及时找出风电场内的振荡源机组并采取有效措施抑制振荡,防止机组大面积脱网,对于风电场及电力系统正常运行是非常重要的。而风电场包含多台机组且每台机组的振荡特性不仅与机组内部控制系统参数有关,还与受到的外部扰动有关,如风速变化、塔影效应和风剪切造成的风力机机械转矩周期性波动^[5-6]。因此需要考虑机组控制系统参数、风速、塔影效应和风剪切等因素的影响,对风电场内的次同步振荡源机组进行定位,以便采取合理措施抑制振荡^[7-10]。

在电力系统的振荡源定位研究中,国内外专家采用不同的方法得到了很多有益成果^[11-17],如等效电路法^[11]、动态相量测量算法^[12]、暂态能量流法^[13]等。其中,暂态能量流法不依赖于具体模型,计算变量易于获得,被专家学者们广泛采用,最早应用于传统电力系统的低频振荡源^[18-20]、次同步振荡源^[21-24]定位研究。目前专家学者将暂态能量流法推广到风电并网系统发生低频振荡和次同步振荡时阻尼特性及机理研究中。例如:文献[12,25-26]利用机组消耗的能量分析机组阻尼特性,即消耗能量的机组具有正阻尼,产生能量的机组具有负阻尼;文献[27-28]利用系统的暂态能量分析了电力系统发生振荡时,风电机组与电网的相互作用及振荡在电网的传播机理。暂态能量流法也用于风电场内风电机组的阻尼

特性分析及振荡源定位的研究。例如:文献[29]以双馈风电机组为例,把双馈风电机组分解为风力机子系统、发电机及励磁子系统和网侧变流器子系统;在假设风速不变的情况下,推导了双馈风电机组及其各子系统的暂态能量函数,计算了暂态能量流和能流功率;分析了变流器控制参数变化对机组能量和能流功率的影响机理;以机组向外输出能量为正值作为参考方向,根据机组输出暂态能量及能流功率正负对风电场内发生次同步振荡的机组进行定位。

风力机的塔影效应和风剪切导致风力机机械转矩周期性波动且随风速变化而变化^[6],其施加于机组,相当于机组的强迫振荡源。即使风电机组的阻尼为正,没有发生次同步振荡,周期性波动的风力机功率也造成机组输出功率中含有低频振荡分量,机组输出能量,能流功率为正^[5]。当风电机组阻尼为负时,风力机功率在双馈风电机组内传播、变换过程中,将与机组的机械、电气、控制等各环节耦合,共同影响机组功率振荡^[6]。因此,无论双馈风电机组阻尼是正还是负,在计及塔影效应和风剪切并考虑风速变化时,机组都输出能量,其能流功率为正值。若仅根据风电机组输出能量,则能流功率为正作为依据对风电场内次同步振荡源机组进行定位是不合理的。为此,需要计及塔影效应和风剪切并考虑风速变化及机组阻尼大小,研究风电场内次同步振荡源的定位。目前尚缺乏这方面的研究。

机组控制参数、风速、塔影效应和风剪切等参数对双馈风电机组及其各子系统的暂态能量的影响机理不同^[5-6]。因此,本文以双馈风电场为例,分析上述运行参数变化对机组及其各子系统能流功率的影响机理;推导并定义双馈风电机组及其各子系统能流功率变化率;提出以机组能流功率变化率大于0作为风电场内次同步振荡源定位的判据;最后通过仿真进行验证。

收稿日期:2024-12-12;修回日期:2025-06-13

在线出版日期:2025-07-01

基金项目:国家电网公司科技项目(SGTYHT/23-JS-001)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGTYHT/23-JS-001)

1 双馈风电机组的暂态能量函数及能流功率

当考虑风力机的塔影效应和风剪切时,通过傅里叶变换得到风力机输入风速的等效风速 V_{eq} 表达式为 $V_{eq} = V_0 + \sum_{i=1}^5 n_i \cos(2\pi f t)$, 式中具体参数含义见文献[5]。将双馈风电机组分为风力机子系统、发电机及励磁子系统和网侧子系统,各子系统的能量函数分别为 W_{11} 、 W_{12} 和 W_2 , 双馈风电机组的总能量函数 $W = W_{11} + W_{12} + W_2$ 。在等效风速下,各个子系统的能量函数表达式见文献[6],在此不再赘述。

在 W_{11} 、 W_{12} 、 W_2 中包含与积分路径无关的周期分量(保守项)和与积分路径有关的非周期分量(非保守项);其中保守项对应机组的暂态能量,非保守项反映机组消耗的能量,直接体现为能量的上升或下降趋势。为了方便研究,把暂态能量函数中非保守项的变化率定义为能流功率,反映机组消耗或发出能量的变化。下面对 W_{11} 、 W_{12} 、 W_2 进行求导运算,得到双馈机组及其子系统的能流功率表达式。

1.1 风力机子系统能流功率

依据输入风速的大小,风力机有2种运行模式:当风速低于机组额定风速时,机组采用最大功率点跟踪控制,使其运行在最佳功率点;当风速大于等于机组额定风速时,采取桨距角控制使机组运行在额定状态。在上述2种运行模式下对文献[6]中风力机子系统能量函数 W_{11} 求导得到能流功率 N_{11} 。

当输入风速小于额定风速时,风力机子系统能流功率 N_{11} 为:

$$N_{11} = -D_{ww} \omega_0 \omega_w^2 - D_{gg} \omega_0 \omega_g^2 - D_{wg} \omega_0 \omega_{wg}^2 + (1-s) \left(\frac{3\omega_0^2 L_m i_{sd}}{2L_r'} + \frac{3\omega_0^2 L_m i_{rd}}{2L_s L_r'} \right) \times \left\{ \int \left[k_{p2} \left[k_{p1} (P_{ref} - P_g) + k_{i1} \int (P_{ref} - P_g) dt - i_{rq} \right] + k_{i2} \left\{ k_{p1} (P_{ref} - P_g) + k_{i1} \int \left[\int (P_{ref} - P_g) dt \right] dt - \int i_{rq} dt \right\} \right] dt \right\} \quad (1)$$

式中: D_{ww} 和 D_{gg} 分别为风力机和发电机质量块的自阻尼系数; D_{wg} 为风力机和发电机质量块之间的互阻尼系数; ω_0 为同步转速; ω_w 为风力机和发电机轴系质量块相对于同步旋转参考轴的电气角速度之差, $\omega_{wg} = \omega_w - \omega_g$, ω_w 和 ω_g 分别为风力机和发电机轴系质量块相对于同步旋转参考轴的电气角速度; s 为转差率; L_r' 为等效电感, $L_r' = L_r - L_m^2/L_s$, L_r 为转子自感, L_s 为定子自感, L_m 为定子、转子之间的互感; i_{sd} 为定子电流 d 轴分量有效值; i_{rd} 为转子电流 d 轴分量有效值; i_{rq} 为转子电流 q 轴分量有效值; k_{p1} 和 k_{i1} 分别为有功功率控制的比例系数和积分系数; k_{p2} 和 k_{i2} 分别为转子侧变流器电流控制的比例系数和积分系数; P_{ref} 和 P_g 分别为有功功率的参考值和发电机输出功率。

当输入风速大于等于额定风速时,风力机子系统能流功率 N_{11} 为:

$$N_{11} = -D_{ww} \omega_0 \omega_w^2 - D_{gg} \omega_0 \omega_g^2 - D_{wg} \omega_0 \omega_{wg}^2 + \frac{1}{2} \rho \pi \omega_0 R^2 V_{eq}^3 \times \left\{ 0.5176 \left\{ \frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \left[k_{jp1} (P_g - P_{gref}) + k_{ji1} \int (P_g - P_{gref}) dt + k_{jp2} (P_w - P_{wref}) + k_{ji2} \int (P_g - P_{wref}) dt \right] - 5 \right\} e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} + 0.0068 \lambda \right\} \quad (2)$$

式中: ρ 为气体密度; R 为叶轮半径; λ 为叶尖速比; λ_i 为等效叶尖速比; k_{jp1} 、 k_{jp2} 、 k_{ji1} 、 k_{ji2} 为桨距角控制参数; P_{gref} 为发电机额定功率; P_{wref} 为风力机额定机械功率; P_w 为风力机的机械功率。

1.2 发电机及励磁子系统能流功率

对文献[6]中发电机及励磁子系统的能量函数 W_{12} 求导得到能流功率 N_{12} 为:

$$N_{12} = -\frac{X_m + X_r}{X_m R_r} (u_{rd} e_{q1}' - u_{rq} e_{d1}') + \frac{(X_m + X_r)^2}{\omega_0 R_r X_m^2} \left[(e_{q1}')^2 + (e_{d1}')^2 \right] - \frac{s \omega_0}{R_r} \left(X_m u_{rd} i_{sq} + X_r u_{rd} i_{rq} + X_m u_{rq} i_{sd} + X_r u_{rq} i_{rd} - \frac{X_m + X_r}{X_m} u_{rd} e_d' - \frac{X_m + X_r}{X_m} u_{rq} e_q' \right) - \frac{2s(X_m + X_r)^2}{R_r X_m^2} \times \left\{ e_{q1}' \left[e_d' - \frac{X_m}{X_m + X_r} (X_m i_{sq} + X_r i_{rq}) \right] + e_{d1}' \left[\frac{X_m}{X_m + X_r} \times (X_m i_{sd} + X_r i_{rd}) - e_q' \right] + \frac{\omega_0 s^2}{R_r} \left\{ (X_m i_{sq} + X_r i_{rq}) - \frac{X_m + X_r}{X_m} e_d' \right\} + \left[\frac{X_m + X_r}{X_m} e_q' - (X_m i_{sd} + X_r i_{rd}) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

式中: R_r 为转子电阻; X_m 和 X_r 分别为励磁电抗和转子回路电抗; u_{rd} 、 u_{rq} 分别为转子电压 d 、 q 轴分量; i_{sq} 为定子电流 q 轴分量; e_d' 、 e_q' 分别为暂态电压源 d 、 q 轴分量; e_{d1}' 、 e_{q1}' 分别为与转差率无关的电压源 d 、 q 轴分量。

1.3 网侧子系统能流功率

双馈风电机组网侧子系统能量函数是与路径无关的保守项^[28],其能流功率为0。

综上所述,双馈风电机组能流功率 N_{all} 为风力机子系统能流功率 N_{11} 和发电机及励磁子系统能流功率 N_{12} 之和,如式(4)所示。

$$N_{all} = N_{11} + N_{12} \quad (4)$$

2 运行参数变化时双馈风电机组及其子系统能流功率和暂态能量的变化规律

双馈风电机组的运行参数影响机组的输出能量。在这些影响因素中,机组本身的阻尼由电气量、控制参数等决定,而风速变化以及由塔影效应和风

剪切造成的功率波动是机组的外部扰动。下面分别在正、负机组阻尼情况下,考虑风力机输入风速小于机组额定风速和大于等于额定风速2种运行工况,分析双馈风电机组及其子系统能流功率和暂态能量的变化规律。

2.1 风速变化时正阻尼双馈风电机组及其子系统能流功率的变化规律

当输入风速小于额定风速时,考虑塔影效应和风剪切的等效风速作用,在正阻尼双馈风电机组输出功率中仅包含低频振荡的功率分量,机组及各子系统向外发散能量,其能流功率都为正。一方面,随着风速增大,双馈风电机组所受扰动增大,风力机子系统输出的能量 W_{11} 、发电机及励磁子系统输出的能量 W_{12} 均增大,2个子系统的能流功率 N_{11} 、 N_{12} 均随输入风速增大而增大^[5]。另一方面,随着风速增大,风力机子系统消耗的能量增大,抑制等效风速扰动造成的能量上升。然而,随着风速增大,发电机及励磁子系统消耗的能量减小,等效风速扰动将导致能量进一步上升^[6]。因此,风力机子系统、发电机及励磁子系统能流功率的增大趋势随风速增大而有所不同。风力机子系统能流功率的增加量 ΔN_{11} 随风速的增大而减小,而发电机及励磁子系统能流功率的增加量 ΔN_{12} 随风速的增大而增大。由于风力机子系统能流功率变化幅度大于发电机及励磁子系统能流功率的变化幅度^[6],对于双馈风电机组而言,风速增大时其能流功率增加量 ΔN_{all} 的变化趋势与风力机子系统能流功率增加量 ΔN_{11} 的变化趋势相同,即机组能流功率增加量 ΔN_{all} 随风速增大而减小。

当输入风速大于等于额定风速时,机组在额定状态下运行从而保持额定转速不变,机组转差率 s 接近0。在低频扰动下,双馈风电机组及其子系统均输出能量,能流功率为正,其不随风速变化而变化。因此,该运行工况下,当风速变化时,双馈风电机组及其子系统的能流功率变化率为0。

2.2 风速变化时负阻尼双馈风电机组及其子系统能流功率的变化规律

当输入风速小于额定风速时,改变双馈风电机组转子侧变流器控制参数使其阻尼为负,此时机组发生次同步振荡。在考虑塔影效应和风剪切的等效风速作用下,含低频振荡分量的风力机功率流入发生次同步振荡的双馈风电机组后,不同时间尺度的振荡耦合,加剧了机组的低频振荡和次同步振荡。风电机组及其子系统向外发散能量,其能流功率 N_{all} 、 N_{11} 、 N_{12} 均为正,且随着风速的增大而增大。尽管风力机子系统消耗的能量随风速增大而增大,其能流功率的增加量随风速增大而减小,但是等效风速扰动不能抑制机组的低频振荡分量和次同步振荡分量相互作用所导致的风力机子系统能流功率的进一步上升^[6]。因此,风力机子系统能流功率的增加

量 ΔN_{11} 随风速增大而增大。而发电机及励磁子系统消耗的能量随风速增大而减小,其能流功率的增加量 ΔN_{12} 随风速增大而增大。因此,2个子系统能流功率随风速增大的变化趋势相同,即其能流功率的增加量随风速的增大进一步上升。综上所述,对于双馈风电机组而言,随着风速的增大,其能流功率的增加量 ΔN_{all} 进一步升高。

当输入风速大于等于额定风速时,双馈风电机组在额定状态下运行,保持额定转速不变,机组转差率 s 接近0。在低频扰动下,机组的中低频振荡分量和次同步振荡分量相互作用加剧了机组输出功率的振荡现象,双馈风电机组及其各子系统向外发散能量,其能流功率 N_{all} 、 N_{11} 、 N_{12} 均为正,但随风速变化保持不变。因此,当风速变化时,双馈风电机组及其子系统的能流功率变化量也为0。

综上所述,当计及塔影效应和风剪切并考虑风速变化时,无论双馈风电机组的阻尼是正还是负,机组的输出能量、能流功率均为正值。当风速小于机组额定风速时,机组的输出能量、能流功率随风速的增大而增大;当风速大于等于机组额定风速时,机组的输出能量、能流功率不随风速变化而变化。当双馈风电机组为正阻尼时,其能流功率的增加量随风速增大而减小;当双馈风电机组为负阻尼并发生次同步振荡时,其能流功率的增加量随风速增大而增大。

因此,当运行参数变化时,可利用双馈风电机组能流功率的变化对双馈风电场内次同步振荡源进行定位。由于双馈风电机组及其子系统的能流功率为风速的函数,对其风速求导可得双馈风电机组及其子系统能流功率的变化率。

3 双馈风电机组能流功率变化率及风电场内次同步振荡源定位判据

3.1 双馈风电机组能流功率变化率

当输入风速小于额定风速时,风力机子系统能流功率变化率 $k_{N_{11}}$ 为:

$$k_{N_{11}} = \frac{dN_{11}}{dV_{\text{eq}}} = -2D_{\text{ww}} \omega_0 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^2 V_{\text{eq}} - 2D_{\text{gg}} \omega_0 \left[\frac{2H_w \lambda}{R(J-2H_g)} \right]^2 V_{\text{eq}} - 2D_{\text{wg}} \omega_0 \left\{ \frac{\lambda}{R} \left[1 - \frac{2H_w}{(J-2H_g)} \right] \right\}^2 V_{\text{eq}} + \frac{2H_w \lambda}{R \omega_0 (J-2H_g)} \times \left(\frac{3\omega_0^2 L_m i_{sd}}{2L_r'} + \frac{3\omega_0^2 L_m i_{rd}}{2L_s L_r'} \right) \left\{ \int \left\{ k_{p2} \left[k_{p1} (P_{\text{ref}} - P_g) + k_{p1} \int (P_{\text{ref}} - P_g) dt - i_{iq} \right] + k_{i2} \left\{ k_{p1} (P_{\text{ref}} - P_g) + k_{i1} \int \left[\int (P_{\text{ref}} - P_g) dt \right] dt - \int i_{iq} dt \right\} \right\} dt \right\} \quad (5)$$

式中: J 为风电机组转动惯量; H_w 为风力机质量块惯性常数; H_g 发电机质量块惯性常数。

当输入风速大于等于额定风速时, 风力机子系统能流功率变化率 $k_{N_{11}}$ 为:

$$k_{N_{11}} = \frac{dN_{11}}{dV_{eq}} = -2D_{ww}\omega_0 \left(\frac{\lambda}{R} \right)^2 V_{eq} - 2D_{gg}\omega_0 \left[\frac{2H_w\lambda}{R(J-2H_g)} \right]^2 V_{eq} - 2D_{wg}\omega_0 \left[\frac{\lambda}{R} \left(1 - \frac{2H_w}{J-2H_g} \right) \right]^2 V_{eq} + \frac{3}{2} \rho \pi \omega_0 R^2 V_{eq}^2 \times \left\{ 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \left[k_{jp1} (P_g - P_{gref}) + k_{ji1} \int (P_g - P_{gref}) dt + k_{jp2} (P_w - P_{wref}) + k_{ji2} \int (P_g - P_{wref}) dt \right] - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} + 0.0068 \lambda \right\} \quad (6)$$

发电机及励磁子系统能流功率变化率 $k_{N_{12}}$ 为:

$$k_{N_{12}} = \frac{dN_{12}}{dV_{eq}} = \frac{2H_w\lambda}{RR_r(J-2H_g)} \left(X_m u_{rd} i_{sq} + X_r u_{rd} i_{rq} + X_m u_{rq} i_{sd} + X_r u_{rq} i_{rd} - \frac{X_m + X_r}{X_m} u_{rd} e'_d - \frac{X_m + X_r}{X_m} u_{rq} e'_q \right) + \frac{4H_w\lambda(X_m + X_r)^2}{RR_r X_m^2 \omega_0 (J-2H_g)} \left\{ e'_{q1} \left[e'_d - \frac{X_m}{X_m + X_r} (X_m i_{sq} + X_r i_{rq}) \right] + e'_{d1} \left[\frac{X_m}{X_m + X_r} (X_m i_{sd} + X_r i_{rd}) - e'_q \right] \right\} - 2 \left[1 - \frac{2H_w\lambda V_{eq}}{R\omega_0(J-2H_g)} \right] \times \frac{2H_w\lambda}{RR_r(J-2H_g)} \left\{ \left[(X_m i_{sq} + X_r i_{rq}) - \frac{X_m + X_r}{X_m} e'_d \right]^2 + \left[\frac{X_m + X_r}{X_m} e'_q - (X_m i_{sd} + X_r i_{rd}) \right]^2 \right\} \quad (7)$$

双馈风电机组能流功率变化率 $k_{N_{all}}$ 为风力机子系统能流功率变化率 $k_{N_{11}}$ 和发电机及励磁子系统能流功率变化率 $k_{N_{12}}$ 之和, 即 $k_{N_{all}} = k_{N_{11}} + k_{N_{12}}$ 。

3.2 双馈风电场次同步振荡源定位判据

由前文分析可得, 在输入风速小于额定风速运行工况下, 当双馈风电机组阻尼为正且无次同步振荡发生时, 双馈风电机组能流功率增加量随风速的增加而减小, 能流功率变化率小于 0; 当双馈风电机组阻尼为负而发生次同步振荡, 机组能流功率增加量随风速增大而增大时, 能流功率变化率大于 0。因此双馈风电场内次同步振荡源机组的定位判据为:

$$k_{N_{all}} > 0 \quad (8)$$

当输入风速大于等于额定风速时, 能流功率变化率为 0, 不能根据式(8)的判据进行振荡源定位。

4 仿真分析

为了研究本文提出的双馈风电场内次同步振荡源定位的合理性, 在 PSCAD/EMTDC 上搭建双馈风电机组单机模型, 计及塔影效应和风剪切的等效风速作用, 并考虑风速变化, 分析双馈风电机组的输出能量、能流功率及其变化率; 搭建双馈风电场模型, 利用机组能流功率变化率对风电场内的次同步振荡源进行定位分析。

4.1 双馈风电机组输出能量、能流功率及能流功率变化率的特性仿真

双馈风电机组的单机无穷大系统模型见附录 A 图 A1, 双馈风电机组、变压器、线路参数见附录 A 表 A1。设线路串补度为 40%; 机组的额定输入风速为 10 m/s。双馈风电机组分别以正、负阻尼 2 种形式运行, 考虑风速变化进行仿真, 采集风电机组出口处电压、电流瞬时值代入能量函数、能流功率和能流功率变化率的公式计算, 分析风力机子系统、发电机及励磁子系统和双馈风电机组的暂态能量、能流功率及能流功率变化率的特性。仿真过程中机组的暂态能量、能流功率及能流功率变化率均为标么值。

4.1.1 正阻尼双馈风电机组输出能量、能流功率及能流功率变化率的仿真

当输入风速小于额定风速时, 设置双馈风电机组转子侧变流器的电流内环控制比例、积分参数分别为 $k_{p2}=2$ 、 $k_{i2}=0.0303$, 机组正阻尼运行, 输入风速在 3~10 m/s 变化, 经仿真计算得到双馈风电机组及其子系统的能量变化如附录 A 图 A2 所示, 能流功率如附录 A 表 A2 所示, 能流功率的变化量如表 1 所示。

表 1 当机组正阻尼运行、风速小于额定风速时, 机组及其子系统能流功率变化量

Table 1 Variation in energy flow power of unit and its subsystems when unit is in positive damped operation and wind speed is less than rated wind speed

等效风速 变化量 / (m·s ⁻¹)	能流功率变化量		
	风力机 子系统	发电机及 励磁子系统	机组
[3,4)	1.4177	0.20660	1.6243
[4,5)	1.2785	0.25116	1.5297
[5,6)	1.1375	0.27247	1.4100
[6,7)	0.9639	0.34585	1.3097
[7,8)	0.6468	0.53613	1.1829
[8,9)	0.3034	0.73602	1.0394
[9,10]	0.2407	0.73611	0.9768

由图 A2 和表 A2 可知, 当机组正阻尼运行时, 双馈风电机组及其各个子系统输出能量, 能流功率均为正值。由表 1 可知, 风力机子系统能流功率增加量随风速增大而减小, 发电机及励磁子系统能流功率增加量随风速增大而增大, 且风力机子系统能流功率增加量的变化量大于发电机及励磁子系统能流

功率增加量的变化量。因此,在这种情况下双馈风电机组的能流功率变化趋势随风速变化的规律与风力机子系统相同,均随风速增大而减小。进一步得到双馈风电机组的能流功率变化量如附录A图A3所示,由此可以看出,正阻尼运行时机组的能流功率变化率 $k_{N_{ad}} < 0$ 。

当输入风速大于等于额定风速时,风速在12~14 m/s内变化,计算得到双馈风电机组及其子系统能量如附录A图A4所示,能流功率如附录A表A3所示,能流功率的变化量如附录A表A4所示。由图A4、表A3和表A4可知,当输入风速大于等于额定风速时,双馈风电机组以恒功率运行,机组及其子系统输出能量、能流功率均为正值且不随风速变化而变化,因此机组及其子系统能流功率变化量均保持不变,且维持在0附近。

4.1.2 负阻尼双馈风电机组输出能量、能流功率及能流功率变化率的仿真

当输入风速小于额定风速时,调节机组控制参数 $k_{p2}=2$ 、 $k_{i2}=0.012$,双馈风电机组在负阻尼下运行,此时机组发生次同步振荡,输入风速在3~9 m/s变化,仿真计算得到双馈风电机组及其子系统能量如附录A图A5所示,能流功率如附录A表A5所示,能流功率的变化量如附录A表A6所示。

由图A5和表A5可知,当机组阻尼为负时发生次同步振荡,双馈风电机组及其子系统的输出能量、能流功率均为正值且随风速的增大而增大,与4.1.1节机组以正阻尼运行时相比能流功率明显增大。由表A6可知,风力机子系统和发电机及励磁子系统的能流功率增加量都随风速增大而增大,与4.1.1节机组以正阻尼运行时相比风力机子系统能流功率增加量随风速变化趋势不同。进一步得到当机组发生次同步振荡时,双馈风电机组的能流功率变化量如图1所示,由此可以看出,双馈风电机组的能流功率变化率 $k_{N_{ad}} > 0$ 。

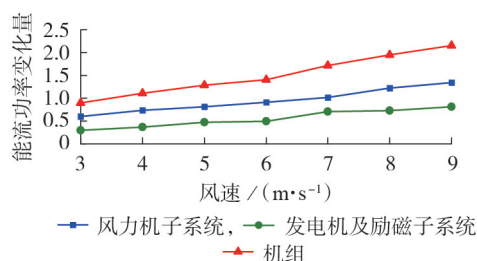


图1 当机组负阻尼运行、风速小于额定风速时,机组及其子系统能流功率变化量

Fig.1 Variation in energy flow power of unit and its subsystems when unit is in negative damped operation and wind speed is less than rated wind speed

当输入风速大于等于机组的额定风速时,双馈风电机组以恒功率运行,机组及其子系统输出能量,

能流功率都为正值且不随风速变化而变化,因此机组及其子系统能流功率变化量均不变,且维持在0附近。

4.2 风电场内次同步振荡机组定位仿真

下面以附录B图B1所示的4台双馈风电机组($G_1—G_4$)组成的风电场为例,在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建双馈风电场经串补并网系统的仿真模型,对风电场内的次同步振荡源进行定位仿真。机组变压器、升压变压器变比分别为0.69 kV/35 kV、35 kV/220 kV;风电场内机组的并网线路采用电缆,长度均为1 km,在每条线路上均设置电流和电压瞬时值测点;线路的串补度为40%。

为了对风电场运行过程中次同步振荡源进行定位,将机组阻尼设置为不同值。设置 G_1 的变流器电流内环比例、积分控制参数分别为 $k_{p2}=0.1$ 、 $k_{i2}=1.0$,阻尼较弱但是为正阻尼; $G_2—G_4$ 为强阻尼,参数与4.1.1节设置相同。假设4台机组的风速变化规律相同,在 $[0,2)$ s内输入风速为8 m/s;在 $[2,10]$ s内风速由8 m/s降至4 m/s。通过仿真得到4台机组的输出功率和能流功率变化率,分别如图2、3所示。

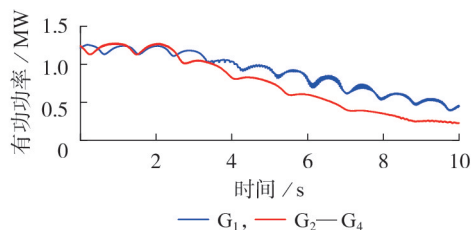
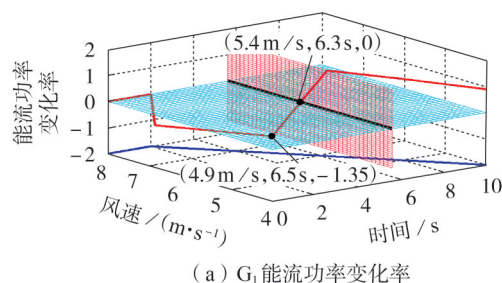
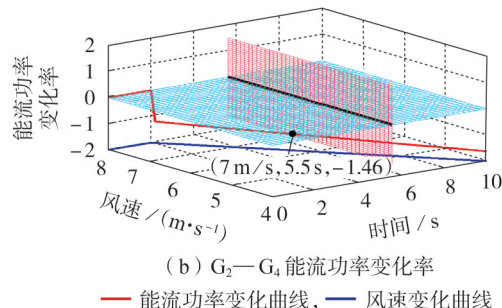


图2 风速变化时风电场内机组输出功率

Fig.2 Output power of units in wind farm when wind speed varies



(a) G_1 能流功率变化率



(b) $G_2—G_4$ 能流功率变化率

图3 风速变化时风电场内机组能流功率变化率

Fig.3 Rate of change of unit energy flow power in wind farm when wind speed varies

由图3(a)可知,弱阻尼机组 G_1 在 $[0, 2)$ s内风速保持 8 m/s 不变,机组输出功率仅包含由塔影效应和风剪切造成的低频振荡分量,其能流功率保持不变,能流功率变化率为0,虽然 G_1 的阻尼为弱阻尼且随风速减小而减小,但其仍为正值,机组能流功率变化量随风速减小而增大,因此机组能流功率变化率 $k_{N_{\text{出}}}<0$,未发生次同步振荡;在 $[2, 4.9)$ s内风速从 8 m/s 减小到 6.5 m/s , $k_{N_{\text{出}}}=-1.35$,随着风速的进一步降低,机组的阻尼下降为负阻尼,机组能流功率变化量随风速减小而减小,因此自风速降低为 6.3 m/s 时机组能流功率变化率 $k_{N_{\text{出}}}>0$,随着风速进一步降低,机组能流功率变化率逐渐增大,机组发生次同步振荡。

由图3(b)可知:强阻尼机组 G_2-G_4 在 $[0, 2)$ s内的能流功率变化量保持为0, $[2, 10]$ s风速从 8 m/s 降至 4 m/s ,机组能流功率变化量随风速降低而增大,因此机组能流功率变化率 $k_{N_{\text{出}}}<0$,未发生次同步振荡。

分别对 $[2, 3)$ s和 $[6, 7)$ s内各台机组输出功率进行频谱分析,得到 G_1 和 G_2-G_4 输出功率的频谱如图4所示。 $[2, 3)$ s, G_1 输出功率中仅包含低频振荡分量,未发生次同步振荡; $[6, 7)$ s, G_1 发生次同步振荡,输出功率中既包含低频振荡分量又包含次同步振荡分量;其他机组的输出功率仅包含低频振荡分量。由此可得,在风速变化过程中,利用双馈风电机组的能流功率变化率 $k_{N_{\text{出}}}>0$ 作为判据,可判别 G_1 发生次同步振荡。

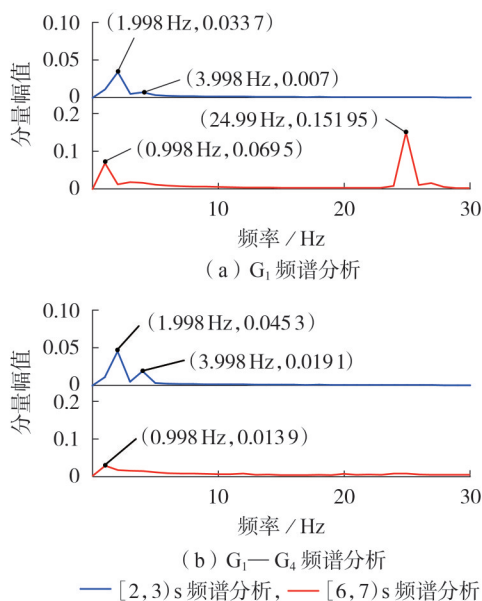


图4 机组输出有功功率频谱图

Fig.4 Spectrogram of active power output of each unit

5 结论

本文以双馈风电场为例,考虑机组运行参数变

化,分析风力机子系统、发电机及励磁子系统以及机组的暂态能量、能流功率的变化规律;推导并定义机组能流功率的变化率,提出根据机组能流功率的变化率对双馈风电场内次同步振荡源定位的依据;通过仿真验证所提依据的合理性。最终得出如下结论。

1)当双馈风电机组阻尼为正时,其风力机子系统、发电机及励磁子系统的能流功率随风速变化的变化趋势不同;风力机子系统能流功率的增加量随风速的增大而减小,而发电机及励磁子系统的能流功率的增加量随风速增大而增大。

2)当双馈风电机组阻尼为负时,风力机子系统、发电机及励磁子系统的能流功率随风速变化的变化趋势相同。2个子系统能流功率的增加量随风速增大而增大。

3)当计及风速、塔影效应和风剪切影响以及机组控制参数和运行参数变化时,可根据机组能流功率变化率大于0作为判据对双馈风电场内次同步振荡源进行定位。

本文利用双馈风电机组能流功率变化率大于0的判据,对双馈风电场内1台机组发生次同步振荡的情况进行定位判断。所提方法同样适用于多台机组发生次同步振荡的定位判断。而风电场内振荡机组间存在相互影响且其能流功率变化率的大小既可能相同又可能不同,后续将根据能流功率变化率对风电场内次同步振荡的传播途径以及场内主导振荡的机组进行研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张剑云. 哈密并网风电场次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5447-5460.
Zhang Jianyun. Research on the mechanism of subsynchronous oscillations of wind farms in Hami[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5447-5460.
- [2] 朱克平, 何英静, 但扬清, 等. 风电场并网振荡的频域网络分析及抑制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 27-36.
Zhu Keping, He Yingjing, Dan Yangqing, et al. Frequency-domain network analysis and suppression for oscillations in grid-connected wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2023, 35(2): 27-36.
- [3] 吴天昊, 谢小荣, 姜齐荣. 风电系统次同步等幅振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2689-2698.
Wu Tianhao, Xie Xiaorong, Jiang Qirong. On subsynchronous sustained oscillation issues of wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2689-2698.
- [4] 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.
Wang Weisheng, Zhang Chong, He Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [5] 曹娜, 万珂, 于群. 考虑风速变化的双馈风电机组暂态能量函

- 数及振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(20): 92-99.
- Cao Na, Wan Ke, Yu Qun. Transient energy function and oscillation analysis of doubly-fed wind turbines considering variation of wind speed[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 92-99.
- [6] 曹娜, 苏亚妮, 于群. 运行参数变化时双馈风电机组振荡机理及特性研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 54-64.
- Cao Na, Su Yani, Yu Qun. Study on oscillation mechanism and features of doubly-fed wind turbines with operating parameters changings[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(3): 54-64.
- [7] 张智豪, 寇鹏, 田润泽, 等. 海上风电柔直并网系统多模态振荡交互分析和抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2026, 50(4): 10-23.
- Zhang Zhihao, Kou Peng, Tian Runze, et al. Analysis and suppression method for multi-modal oscillation interaction in flexible DC grid-connected system of offshore wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2026, 50(4): 10-23.
- [8] 郭成, 杨宣铭, 王林玲, 等. 基于电流内环滑模自抗扰控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 85-95.
- Guo Cheng, Yang Xuanming, Wang Linling, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for direct-drive wind farm based on current inner loop sliding mode active disturbance rejection control [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 85-95.
- [9] 孙素娟, 侯凯, 孙立鑫, 等. 风电场接入弱电网控制耦合振荡分析及解耦抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(14): 54-64.
- Sun Sujuan, Hou Kai, Sun Lixin, et al. Analysis and decoupling suppression strategy of control coupling oscillation for wind farm connected to weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(14): 54-64.
- [10] 曹炯琼, 张达敏, 曾汉超, 等. 基于改进型LADRC的直驱风机次同步振荡抑制策略[J]. 智慧电力, 2025, 53(4): 62-70.
- Cao Jiongqiong, Zhang Damin, Zeng Hanchao, et al. Improved LADRC based sub-synchronous oscillation suppression strategy for direct-drive permanent magnet synchronous generator [J]. Smart Power, 2025, 53(4): 62-70.
- [11] 杨毅强, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于等效电路法的负阻尼能量机理及振荡源定位方法探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 63-68.
- Yang Yiqiang, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al. Discussion on energy mechanism of negative damping and oscillation source locating method based on equivalent circuit method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 63-68.
- [12] 韩文联. 动态相量测量算法及其在强迫振荡源定位中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- Han Wenlian. Dynamic phasor measurement algorithm and its application in the forced oscillation source location[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [13] 陈磊, 王文健, 王茂海, 等. 利用暂态能量流的次同步强迫振荡扰动源定位及阻尼评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 1-8.
- Chen Lei, Wang Wenjie, Wang Maohai, et al. Disturbance source location of subsynchronous forced oscillation and damping evaluation using transient energy flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 1-8.
- [14] 蒋平, 郑斌青, 冯双. 基于功率及频率波动相位的强迫扰动源定位[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 112-117.
- Jiang Ping, Zheng Binqing, Feng Shuang. Forced disturbance-source locating based on phase-angle between power and frequency fluctuations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 112-117.
- [15] 金标, 余一平, 樊陈, 等. 基于宽频量测谐波潮流计算的次/超同步振荡溯源方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 221-228.
- Jin Biao, Yu Yiping, Fan Chen, et al. Tracing method of sub-/super-synchronous oscillation based on interharmonic power flow calculation of wide frequency measurement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 221-228.
- [16] 李红俊, 董彧, 赵文祥, 等. 考虑关键节点信息缺失的低频振荡扰动源定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 218-223.
- Li Hongjun, Dong Yu, Zhao Wenxiang, et al. Disturbance source location method for low frequency oscillation considering information loss of key nodes [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 218-223.
- [17] 刘洋, 陆秋瑜, 张帆, 等. 构网型储能并网系统全工况振荡特性分析[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(3): 24-32.
- Liu Yang, Lu Qiuyu, Zhang Fan, et al. Analysis of oscillation characteristics of grid forming energy storage grid-connected system under all working conditions [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(3): 24-32.
- [18] 陈磊, 陈亦平, 闵勇, 等. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(二)振荡源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 1-5, 27.
- Chen Lei, Chen Yiping, Min Yong, et al. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part two method for oscillation source location and case studies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5, 27.
- [19] 姜鑫, 易皓, 卓放, 等. 基于直流电压同步的构网型变流器低频振荡分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 30-39.
- Jiang Xin, Yi Hao, Zhuo Fang, et al. Low-frequency oscillation analysis and damping control for grid-forming converters based on DC voltage synchronization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 30-39.
- [20] 薛翼程, 张哲任, 徐政, 等. 构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 103-113.
- Xue Yicheng, Zhang Zheren, Xu Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 103-113.
- [21] 李文锋, 郭剑波, 李莹, 等. 基于WAMS的电力系统功率振荡分析与振荡源定位(1)割集能量法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 41-46, 9.
- Li Wenfeng, Guo Jianbo, Li Ying, et al. Power system oscillation analysis and oscillation source location based on WAMS part 1: method of cutset energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 41-46, 9.
- [22] 刘志坚, 骆军, 梁宁, 等. 虚拟同步控制对风电并网系统次同步振荡阻尼影响分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 135-142.
- Liu Zhijian, Luo Jun, Liang Ning, et al. Analysis of influence of virtual synchronous control on subsynchronous oscillation damping for grid-connected wind power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 135-142.
- [23] 陈曦, 吴熙, 顾文, 等. 基于次同步模态能量的双馈风机并网系统次同步振荡能量分析与溯源方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5863-5877.
- Chen Xi, Wu Xi, Gu Wen, et al. Research on energy analysis and SSO source location method for power grids with DFIGs based on the sub-synchronous modal energy [J]. Proceedings

- of the CSEE, 2023, 43(15): 5863-5877.
- [24] 姜涛, 高焱, 李筱静, 等. 基于小波耗散能量谱的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1737-1750.
Jiang Tao, Gao Han, Li Xiaojing, et al. Forced oscillation source location in power system using wavelet dissipation energy spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1737-1750.
- [25] 孙正龙, 姜权峰, 王嘉琛, 等. 含风电电力系统机电振荡局部阻尼评估方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3452-3466.
Sun Zhenglong, Jiang Quanfeng, Wang Jiachen, et al. Evaluation method of local damping of electromechanical oscillation of power systems containing wind turbines[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3452-3466.
- [26] Shen Y Q, Ma J, Wang L T. Study on DFIG dissipation energy model and low-frequency oscillation mechanism considering the effect of PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3348-3364.
- [27] Ma J, Yang Z M, Zhou Y Q, et al. Study on the oscillation transmission paths in direct-drive wind farm transmitted via flexible DC system based on dynamic energy flow[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(5): 966-987.
- [28] 曹娜, 赵旭, 于群. 基于暂态能量流的双馈风电机组强迫振荡源定位[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 103-110.
Cao Na, Zhao Xu, Yu Qun. Forced oscillation source location of doubly-fed wind turbine based on transient energy flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 103-110.
- [29] 刘俊磊, 曹娜, 钱峰, 等. 考虑双馈风电机组变流器控制参数的风电场内机组振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(10): 42-49.
Liu Junlei, Cao Na, Qian Feng, et al. Analysis of unit oscillation in wind farm considering control parameters of converter for DFIG-based wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 42-49.

作者简介:

曹娜(1971—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为可再生能源发电技术(E-mail: caona_2006@163.com);

潘宏一(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电技术(E-mail: 2488683033@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Localization of sub-synchronous oscillation sources within doubly-fed wind farm based on change rate of energy flow power

Cao Na, Pan Hongyi, Guo Jiaqi, Yu Qun

(School of Electrical and Automation Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: When locating sub-synchronous oscillation sources in an actual wind farm, it is considered that not only the unit control parameters but also the operating parameters including wind speed, tower shadow effect of wind power generator, and wind shear have influence on the energy flow power of the units. Taking the doubly-fed wind farm as an example, the influence laws of the changes of operating parameters such as unit control parameters, wind speed, tower shadow effect and wind shear on the energy flow power of doubly-fed wind power units and their subsystems are analyzed. The change rate of energy flow power of doubly-fed wind power units and their subsystems are deduced and defined, and a criterion for locating sub-synchronous oscillation sources within wind farm is proposed, which takes the condition that the change rate of energy flow power of the unit is greater than 0. The simulation model of doubly-fed wind farm is established on the PSCAD/EMTDC platform, and the rationality of the proposed locating criterion for sub-synchronous oscillation sources in wind farm is verified through the simulation analysis.

Key words: operating parameter; wind farm; change rate of energy flow power; sub-synchronous oscillation source; criterion