

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231334

大规模风电接入场景下的失步振荡中心定位方法

李振兴, 崔丹阳, 胡聪, 朱益, 翁汉琍

(新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 振荡中心的准确定位是失步保护正确动作的基础, 大规模风电并网导致系统阻抗参数发生变化, 使得传统基于阻抗轨迹的失步定位方法的适应性严重下降。针对该问题, 提出基于节点频差的失步振荡中心定位方法。首先分析大规模风电并网对系统总阻抗的影响。进一步根据发电机功角, 计算其曼哈顿距离相似度并构建启动判据。最后, 通过移动平均法对广域测量频率进行平滑处理, 提出基于节点频差的失步振荡中心定位方法。仿真验证表明, 所提基于节点频差的失步振荡中心定位方法受噪声影响较小, 不受风电渗透率的影响, 能够准确定位失步振荡中心位置。

关键词: 双馈风机; 风电渗透率; 等效阻抗; 同步机组失步; 节点电压频差; 振荡中心定位

Out-of-step oscillation center location method in a large-scale wind power integration scenario

LI Zhenxing, CUI Danyang, HU Cong, ZHU Yi, WENG Hanli

(Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The accurate positioning of the oscillation center is the basis for correct action in out-of-step protection. Large-scale wind power integration causes system impedance parameters to change, resulting in a serious deterioration in the adaptability of the traditional out-of-step positioning method based on the impedance trajectory. To tackle this problem, an out-of-step oscillation center location method based on bus frequency is proposed. First, the influence of large-scale wind power integration on the total impedance of the system is analyzed. Further, from the power angle of the generator, the Manhattan distance similarity is calculated and a start-up criterion is constructed. Finally, the moving average method is used to smooth the wide-area measurement frequency, and an out-of-step oscillation center location method based on node frequency difference is proposed. Simulation results show that the proposed method is less affected by noise and is not affected by wind power penetration rate, and can accurately locate the out-of-step oscillation center.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077120).

Key words: double-fed induction generator; wind power penetration rate; equivalent impedance; synchronization unit out-of-step; node voltage frequency difference; oscillation center positioning

0 引言

随着风电渗透率的增加, 电网传统意义上的调度、控制、保护方式等很大程度上都将受到影响^[1-4]。大规模风电并入系统后, 由于风机转动惯量、无功支撑及故障穿越等能力较弱, 将会对系统的暂态稳定性产生影响^[5-10]。特别地, 风电出力的随机性与不确定性以及控制环节的复杂性, 给风机电阻和电抗的等效加大了难度。原配置的基于三阻抗元件的

发电机失步保护难以适应上述特征, 导致失步保护存在失效的风险, 不能有效定位失步振荡中心而造成事故扩大, 因此有必要重新讨论大规模风电机组并网的失步振荡中心定位方法。

目前, 大量研究表明风电机组并网会对电网暂态稳定性造成影响。文献[11-12]将风机等效为可变阻抗, 风电并网系统遭受大扰动时, 风火比例越大, 电网暂态功角稳定性下降越显著。文献[13-14]建立双馈风机功率注入模型, 基于双馈式感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)简化模型和直流潮流模型提出系统暂态功角稳定性判据, 并定性

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077120)

分析了风电场选址、同步机出力和风电渗透率等因素对功角稳定性的影响,其影响程度随着风电渗透率升高变得越发明显。

电力系统中同步发电机组失步振荡给系统安全稳定运行带来威胁,同时风电的接入也会对系统暂态稳定性造成负面影响。若失步振荡中心侵入机群,严重时会造成发电机“雪崩式”脱网,带来极大的损失。在此背景下直面失步振荡风险,实时监测发电机失步状态及失步振荡中心的位置对于电力系统安全稳定运行至关重要。振荡中心迁移受到多重因素影响。例如文献[15-16]认为影响失步振荡中心迁移的主要因素是电网电压幅值和阻抗分布情况,其中文献[15]未推导振荡中心变化规律,文献[16]研究了传统网络中失步中心定位方法。风电并网使得系统总阻抗发生变化,对振荡中心的迁移产生影响。文献[17]利用无功功率积分来捕获失步振荡中心的位置,但是其积分起点难以确定。文献[18]根据系统电压相位差和频率差来综合定位失步振荡中心,该方法主要针对传统电网,新能源并网场景下其实用性有待验证。文献[19-20]利用等值三机系统分析了多频振荡模式下失步振荡中心的迁移规律,得出多频振荡时失步中心在不同线路之间迁移的结论,但利用相位角的失步振荡解列判据存在误判风险。文献[21]针对传统电网研究了切机措施对系统失步振荡中心迁移的影响。在适应风电接入后的振荡中心定位方面,文献[22]在等值双机系统上推导了双馈风机接入时振荡中心的转移函数,但未考虑不同风火比例等因素对失步振荡中心的影响。风电类型以及故障位置的改变都会对系统振荡模式产生影响^[23-25]。

综上所述,风电并网导致系统阻抗发生变化,目前含风电接入电网的失步保护方案,大多通过改进或者直接使用原有的失步保护方案解决,无论是在工程实践还是理论完整性方面,都存在一定不足。本文以常用的双馈式感应发电机(DFIG)为研究对象,对电网故障期间的暂态特性进行研究,提出基于节点频差的失步振荡中心识别方法。在 PSCAD/EMTDC 平台建立大规模风电并网的模型,验证本文所提方案的可行性,在 DFIG 渗透率不同的失步场景下,定位失步振荡中心位置。

1 风电并网对失步振荡的影响

1.1 DFIG 阻抗等效模型

DFIG 通过向电网输送有功功率、无功功率与同步发电机组进行电气交互,进而影响同步机的稳定性,该影响与 DFIG 的机械运动无关^[26]。根据风机在暂态过程的外特性,可以将其等值为负电阻和

负电抗^[27],如式(1)所示。

$$\begin{cases} R = -\frac{u_s^2}{P_E} \\ X = -\frac{u_s^2}{Q_E} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 、 X 分别为经过等值后的电阻和电抗; P_E 、 Q_E 分别为 DFIG 输出的有功功率和无功功率; u_s 为 DFIG 并网点母线电压。

风电并入系统,保持同步发电机组出力恒定,稳态条件下 DFIG 的等效外特性取近似值,如式(2)所示。

$$Y_{\text{DFIG}} = \frac{1}{R + jX} \approx -\frac{|Y|}{j} \quad (2)$$

式中: Y_{DFIG} 为风电机组等效导纳; $|Y|$ 为风电机组等效导纳的模值。

1.2 DFIG 并网对系统总阻抗的影响

DFIG 并网的等值两机模型如图 1 所示。根据 1.1 节风电等效模型,系统稳定运行时的总导纳如式(3)所示。

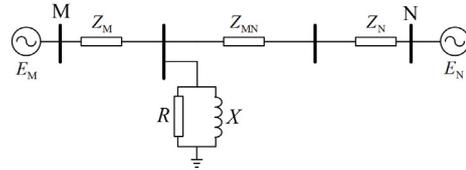


图 1 DFIG 并网的等值两机模型

Fig. 1 Equivalent two-machine model of DFIG grid-connected

$$\frac{1}{Z'_\Sigma} = \frac{1}{Z_M} + \frac{1}{Z_{MN} + Z_N} - |Y| \quad (3)$$

式中: $1/Z'_\Sigma$ 为图 1 所示系统的等效总导纳; Z_M 、 Z_N 分别为送、受端等效阻抗; Z_{MN} 为线路阻抗。

由式(1)可知,稳态运行时,通过调整风机输出有功功率及无功功率,可实现对风机等效外特性的调整,达到改变系统总阻抗的目的。稳态运行情况下,DFIG 接入对系统总阻抗的影响分析如下。

1) 风机输出有功功率、无功功率减小: 由式(1)、式(2)可知,风机等效外特性的负阻抗、负电抗模值增大, $|Y|$ 减小,系统总导纳 $1/Z'_\Sigma$ 增大,系统总阻抗 Z'_Σ 减小。

2) 风机输出有功、无功功率增大: 风机等效外特性的负阻抗、负电抗模值减小, $|Y|$ 增大,系统总导纳 $1/Z'_\Sigma$ 减小,即系统总阻抗 Z'_Σ 增大。

1.3 DFIG 渗透率对电网暂态特性的影响

由式(1)可知,DFIG 渗透率不同,输出的有功

功率 P_E 和无功功率 Q_E 不同, 导致 DFIG 等效阻抗存在差异。风电并网点相同但渗透率不同时, 对发电机功角失稳及三阻抗元件失步保护的影响如图 2 所示。

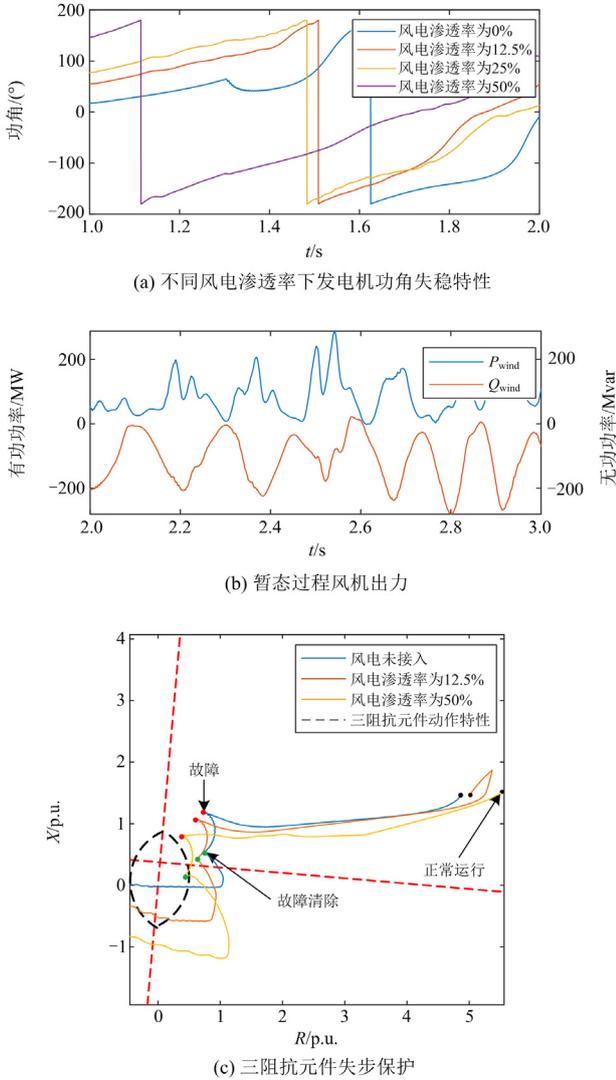


图 2 风电并网下发电机失稳特性

Fig. 2 Instability characteristics of generator under wind power integration

由图 2(a)可以看出, 随着 DFIG 渗透率增大, 同种类型故障导致同步发电机失步速度加快, 不利于系统的稳定运行。同时, 从图 2(b)可以看出, 故障期间当撬棒电路投入运行时, 由于 DFIG 的转子绕组被短接, 转子侧变频器闭锁, 无法对电机的功率输出进行控制, DFIG 蜕化成笼型异步发电机, 此时, 风机将从电网中汲取大量的无功功率用作励磁, 结合式(1)可知, 等值阻抗不再是常数, 其值随 DFIG 出力波动, 导致系统总阻抗不断变化。大规

模风电并网的暂态过程中, 同步发电机端阻抗轨迹如图 2(c)所示, 可见高渗透率风电机组并网时, 阻抗轨迹穿越透镜圆的速度过快或者不穿过透镜圆, 导致基于三阻抗元件的传统失步保护方法失效, 不能有效定位失步振荡中心, 从而失步保护不能正确动作。

发电机失步振荡时, 基于机端测量阻抗的失步保护方法受到 DFIG 阻抗的影响而发生偏移, 难以准确定位失步振荡中心, 导致基于三阻抗元件的失步保护方案存在不适应问题, 需要一种新的失步振荡中心定位方法以满足大规模风电接入系统的需求, 达到失步振荡中心定位的目的。

2 基于节点频差的失步振荡中心定位

2.1 失步振荡中心频率特性

发电机失步振荡时, 等值两机系统任一点电压的瞬时频率如式(4)^[28]所示。

$$\begin{cases} f = f_N + \frac{\Delta f((mb)^2 - mb(m-1)\cos\delta)}{(mb)^2 + (m-1)^2 - 2mb(m-1)\cos\delta} \\ \Delta f = f_M - f_N \\ \delta = \delta_M - \delta_N \\ m = \frac{1}{b+1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f 为等值两机系统任一点电压的瞬时频率; E_M 、 E_N 分别为送、受端等值电势; b 为送、受端电势幅值比, $b = E_M / E_N$; m 为振荡中心位置系数; f_M 、 f_N 分别为送、受端母线电压频率; δ_M 、 δ_N 分别为送、受端功角; Δf 、 δ 分别为送、受端母线电压频率差与功角差。

当系统两侧电压幅值相等, 即 $b=1$ 时, 将 m 代入式(4)的 f 中, 可得失步振荡中心电压瞬时频率 f_c , 如式(5)所示。

$$f_c = f_N + \Delta f \frac{1 + \cos\delta}{2(1 + \cos\delta)} \quad (5)$$

由式(5)可知, 在系统功角为 180° 时, $1 + \cos(\delta_M - \delta_N) = 0$, 瞬时频率为无穷大; 否则, $f_c = (f_M - f_N)/2$, 即失步振荡中心电压瞬时频率等于机组频率的均值。

将电压瞬时频率 f 对功角 δ 求导可得式(6)。

$$\frac{df_c}{d\delta} = \frac{\Delta f \frac{mb}{m-1} \left(1 - \frac{mb}{m-1}\right) \sin\delta}{\left(\frac{mb}{m-1}\right)^2 + 1 - 2\left(1 - \frac{mb}{m-1}\right) \cos^2\delta} \quad (6)$$

由式(6)可知, 当 $m \in (0, 1/(b+1))$ 时, 在 $\delta \in$

$(0, \pi)$ 范围内, 电压频率随功角增大而减小; 在 $\delta \in (\pi, 2\pi)$ 范围内, 电压频率随功角增大而增大; 在 $\delta = \pi$ 时, 失步振荡中心电压瞬时值达到最小值。

当 $m \in (1/(b+1), 1)$ 时, 在 $\delta \in (0, \pi)$ 范围内, 电压频率随功角增大而增大; 在 $\delta \in (\pi, 2\pi)$ 范围内, 电压频率随功角增大而减小; 在 $\delta = \pi$ 时, 失步振荡中心电压瞬时值达到最大值。

综上所述, 在一个振荡周期内, 以失步振荡中心为分界点, 靠近机组侧节点瞬时频率先增大后减小, 在系统功角摆开至 180° 时, 节点瞬时频率达到最大值, 越靠近振荡中心, 最大瞬时频率越大; 另一侧节点瞬时频率先减小后增大, 在系统功角摆开至 180° 时达到最小值, 越靠近振荡中心, 最大瞬时频率越小, 如图 3(a) 所示。

DFIG 并网后, 故障线路两端节点电压频率的变化趋势与传统网络相似, 如图 3(b) 所示。同时由于 DFIG 存在惯量控制环节, 能够改善电网频率, 使得频率偏移程度不会太大, 据此可以通过节点频率变化对大规模风电并网场景下失步振荡中心进行定位。

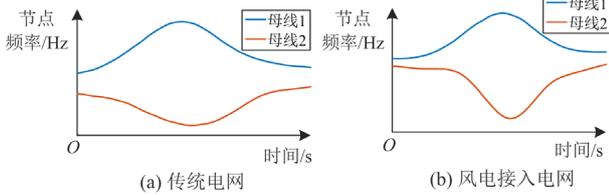


图 3 振荡中心线路两端节点电压频率变化趋势

Fig. 3 Changing trend of bus voltage frequency at both ends of the oscillation center line

2.2 保护启动判据

振荡可分为同步振荡和失步振荡, 同步振荡由于存在阻尼作用随时间衰减, 经过一段时间后可恢复稳定, 故本文只对失步振荡进行研究。

由发电机功角特征可知, 发电机在失步时, 功角 δ 在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之间振荡。因此, 为避免该判据在系统同步振荡时误判, 本文通过检测发电机功角, 利用功角相似度构造启动判据, 据此判断保护是否启动。本文引入曼哈顿距离对功角 δ 进行相似度计算, 具体如式(7)所示。

$$\begin{cases} d = |t_2 - t_1| + |\delta_2 - \delta_1| \\ r = \frac{1}{1+d} \end{cases} \quad (7)$$

式中: t_1 、 t_2 为时间序列; δ_1 、 δ_2 分别为 t_1 、 t_2 时刻对应的功角; d 为功角测量点 (t_1, δ_1) 和 (t_2, δ_2) 之间的曼哈顿距离; r 为相似度系数。曼哈顿距离为不

同采样时刻功角之间的距离, 故本文计算曼哈顿距离相似度能够充分反映功角的变化特性。

曼哈顿距离越大, 样本数值差距越大, 相似度越低; 曼哈顿距离越小, 样本数值差距越小, 相似度越高。本文基于发电机功角的曼哈顿距离相似度构建保护启动判据, 如式(8)所示。

$$r \leq r_{\text{set}} \quad (8)$$

式中, r_{set} 为发电机功角曼哈顿距离相似系数整定值, 当相似系数小于该值时, 保护启动。

为确保 r_{set} 能正确区分正常运行和发电机失步状态, 该值整定须躲过正常运行和故障期间相似度系数, r_{set} 整定如式(9)所示。

$$r_{\text{set}} = k_{\text{rel}} \cdot r_{\text{min}} \quad (9)$$

式中: r_{min} 为正常运行和故障期间相似度系数的最小值; k_{rel} 为可靠系数, 推荐取 0.8。

发电机功角、曼哈顿距离及相似度系数如图 4 所示。

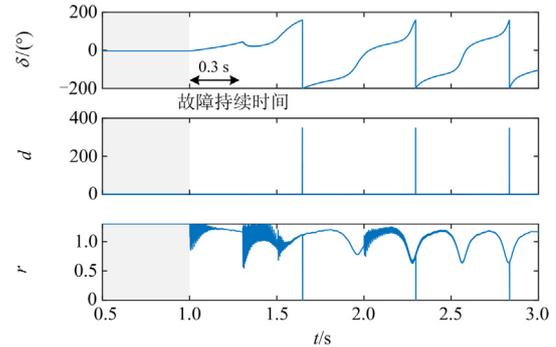


图 4 发电功角、曼哈顿距离及相似度系数

Fig. 4 Power angle, Manhattan distance and similarity

图 4 中灰色部分为正常运行区段, 1~1.3 s 为故障期间, 同步发电机组失步时, 功角 δ 在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 之间振荡。从图 4 可以看出, 系统正常运行时, 功角 δ 趋势稳定, 几乎不变, 其对应的曼哈顿距离 $d \approx 0$, 相似度系数 $r \approx 1$; 在故障期间, 发电机功角 δ 持续爬升, d 、 r 也随功角 δ 发生变化, 但变化幅度较小; 同步发电机组失步后, d 与 r 呈周期性变化, 相较于正常运行和故障期间, 相似度系数 r 大大降低。系统正常运行和故障期间, 相似度系数 $r > 0.5$; 同步发电机组失步以后, 相似度系数 $r < 0.5$, 本文取 $r_{\text{min}} = 0.5$, 此时 $r_{\text{set}} = 0.4$ 。

2.3 节点频率测量及数据处理

在 2.2 节启动判据成立的基础上, 本文基于广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)实时测量的节点电压频率进行研究。WAMS 在信息测量、传输、存储的过程中可能存在数据缺失、数

据异常的问题。为了减少上述问题对定位方法带来不利影响, 本文分别通过均值插补法和均值修正法补充缺失数据和修正异常数据。同时考虑到振荡过程中节点电压频率波形可能存在毛刺等问题, 对失步振荡中心定位产生干扰, 为了减少其他因素的影响, 本文使用移动平均法对频率曲线进行平滑处理, 消除噪声、随机波动的影响, 达到平滑数据的目的。移动平均法计算如式(10)所示。

$$\hat{f}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f_i(j) \quad (10)$$

式中: \hat{f}_i 为第 i 个节点平滑后的频率值; N 为数据窗长度; $f_i(j)$ 为节点 i 在第 j 个采样点的瞬时频率。

选择合适的窗长对于平滑效果十分重要, 数据窗较大输出频率更平滑, 但可能存在保护动作不及时的问题; 数据窗较小能更快地响应数据的变化, 但容易受到噪声的影响。本文采样频率为 4 kHz, 数据窗长度 N 选择 1/6 个周波的采样点数, 此时既能保证保护及时动作, 又能消除噪声的影响。

2.4 失步振荡中心定位

利用平滑后的节点频率构建基于节点频差的失步振荡中心定位方法。无论电网结构如何, 在分析振荡中心影响时, 只关注送端和受端之间的阻抗。为了便于分析, 本文依据等值两机模型及失步振荡中心的特征, 将系统分为三段, 各节点间的频率差如式(11)所示。

$$\begin{cases} \hat{f}_{g-1} = \hat{f}_g - \hat{f}_1 \\ \hat{f}_{1-2} = \hat{f}_1 - \hat{f}_2 \\ \hat{f}_{2-3} = \hat{f}_2 - \hat{f}_3 \end{cases} \quad (11)$$

式中: \hat{f}_{g-1} 、 \hat{f}_{1-2} 、 \hat{f}_{2-3} 分别表示区段 $g-1$ 、 $1-2$ 、 $2-3$ 两端节点电压的瞬时频率差; \hat{f}_g 为发电机端频率; \hat{f}_1 、 \hat{f}_2 、 \hat{f}_3 分别为节点 1~3 的瞬时频率。发电机失步振荡时, 振荡中心所在线路节点电压频差如图 5 所示。

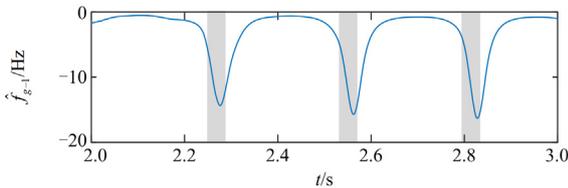


图 5 振荡中心所在线路节点电压频差

Fig. 5 Bus voltage frequency difference of the oscillation center

同步发电机组失步后, 失步振荡中心所在线路两端频率变化趋势相反, 该段频率差较大。图 5 的

阴影部分为三阻抗元件失步保护中发电机端阻抗轨迹穿越透镜圆的实际时间。从图 5 可以看出, 振荡中心所在区段两端节点电压频率差变化较大。借鉴此思想, 在频率法中利用上述特征能够反映失步振荡状态。为此, 应在该区间内构建失步振荡中心定位的判据。

基于该特征, 计算各段节点电压频差变化率和频差凹凸性, 如式(12)和式(13)所示。

$$\begin{cases} k_{g-1}(n) = \hat{f}_{g-1}(n) - \hat{f}_{g-1}(n-1) \\ k_{1-2}(n) = \hat{f}_{1-2}(n) - \hat{f}_{1-2}(n-1) \\ k_{2-3}(n) = \hat{f}_{2-3}(n) - \hat{f}_{2-3}(n-1) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} k'_{g-1}(n) = k_{g-1}(n) - k_{g-1}(n-1) \\ k'_{1-2}(n) = k_{1-2}(n) - k_{1-2}(n-1) \\ k'_{2-3}(n) = k_{2-3}(n) - k_{2-3}(n-1) \end{cases} \quad (13)$$

式中: k 为各段节点频差变化率; k' 为节点频差的凹凸性。节点电压频差变化率和频差凹凸性如图 6 所示。

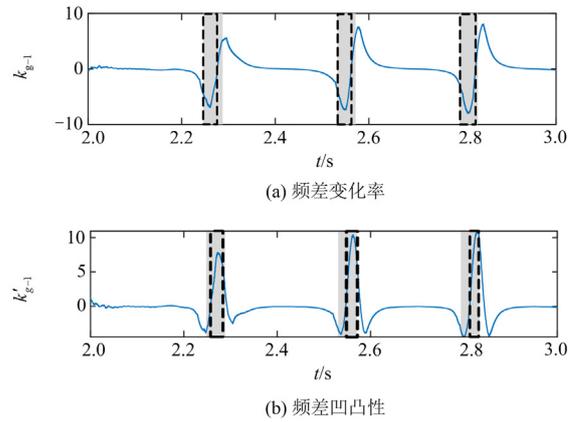


图 6 故障后不同区段节点电压频差变化率及凹凸性

Fig. 6 Changing rate and convexity of bus voltage frequency difference in different sections after fault

图 6 的灰色部分对应于机端测量阻抗轨迹穿越透镜圆的时间, 虚线框分别对应于频差变化率和频差凹凸性所能识别的时间, 通过频差变化率及凹凸性可完全识别图 5 中包含失步振荡中心的特征区段。由前文分析可知, 失步振荡中心所在线路两端频差变化较大, 且频差变化率存在明显差异, 基于该特征对失步振荡中心定位, 如式(14)所示。

$$|\hat{f}| > \hat{f}_{set} \ \& \ (k < 0 | k' > 0) \ 30 \text{ ms} \quad (14)$$

式中: $|\hat{f}|$ 为各区段两端节点频差的绝对值; \hat{f}_{set} 为频差阈值。

发电机失步振荡时, 失步振荡过程中支路两端

节点频差至少相差 5 Hz^[14], 为了避免频率波动导致的定位误差, 乘以可靠系数, 可靠系数推荐取 0.8, 故 \hat{f}_{set} 取 4; k 为频差变化率, 当满足 $|\hat{f}| > \hat{f}_{set}$ 时, 进一步筛选出频差降低的区域: k' 为频差凹凸性, 满足 $|\hat{f}| > \hat{f}_{set}$ 时, 筛选出频差升高的区域。借鉴三阻抗元件失步保护的思想, 构建时间段反映发电机失步振荡状态, 连续 30 ms 满足式(14)则代表失步振荡中心在该线路上。

基于式(14)定位失步振荡中心, 为了使振荡中心表达更清晰, 进行 0、1 变换, 满足式(14)输出为 1, 其余部分输出为 0, 如式(15)所示。

$$F = \begin{cases} 1 & |\hat{f}| > \hat{f}_{set} \ \& \ (k < 0 \ | \ k' > 0) \ 30 \text{ ms} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

2.5 保护流程

根据 2.2—2.4 节分析, 在大规模风电并网场景下构建基于节点频差的失步振荡中心定位方法, 具体流程如图 7 所示。

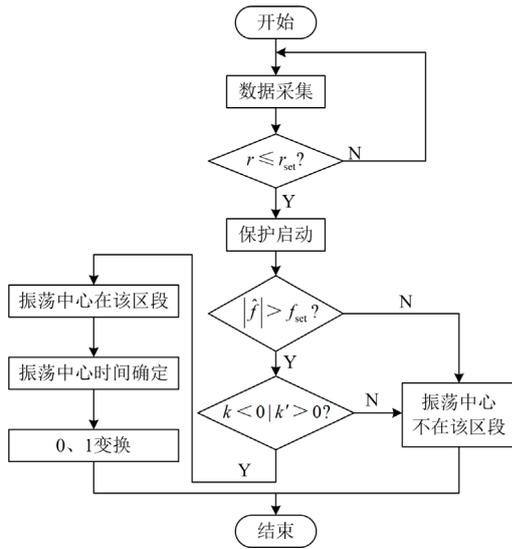


图 7 保护流程图

Fig. 7 Protection flow chart

失步振荡中心定位的具体步骤如下:

- 1) 首先采集节点电压频率、功角信号, 当功角相似度满足式(8)时, 保护启动。
- 2) 保护启动后, 根据式(11)计算的线路两端节点频差, 判断是否满足 $|\hat{f}| > \hat{f}_{set}$, 若满足则失步振荡中心在该线路; 否则, 振荡中心不在该线路上。
- 3) 若在该线路, 进一步根据式(14)确定振荡中心在该区段所对应的时间。
- 4) 为了使振荡中心对应的时间描述更清晰, 根

据式(15)进行 0、1 变换, 各区段振荡中心在对应时间输出为 1, 否则输出为 0, 程序结束。

3 仿真实验

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 8 所示的仿真模型, 对所提方案进行验证。具体仿真参数如下: 发电机 $E_G = 27 \angle 0^\circ \text{ kV}$; 线路 Z_{L11} 、 Z_{L12} 、 Z_{L31} 、 Z_{L32} 、 Z_{L22} 、 Z_{L23} 长度均为 50 km, 线路 Z_{L21} 长度为 100 km, 阻抗均为 $0.006 + j0.472 \ \Omega/\text{km}$; 右侧为无穷大电网, 采样频率为 4 kHz。

在图 8 所示仿真模型中, F_1 为故障点, 故障发生时刻为 $t = 1 \text{ s}$, 故障持续时间为 0.3 s, 故障发生 0.2 s 后切除故障线路。

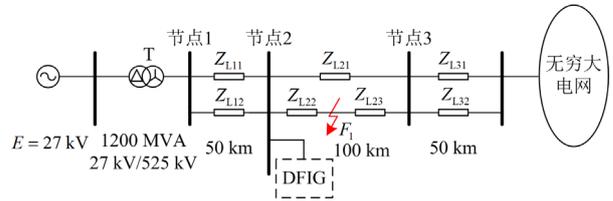


图 8 大规模风电并网的单机无穷大电网示意图

Fig. 8 A schematic diagram of a single machine infinite power grid with large-scale DFIG connected to the grid

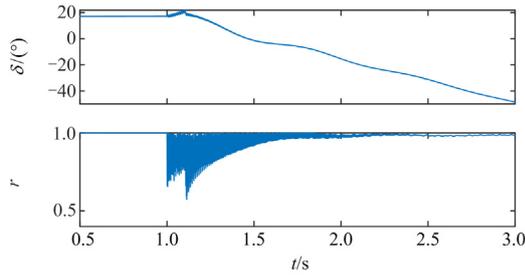
3.1 传统网络中验证频率法的合理性

本节基于传统网络, 即风电渗透率为 0% 时, 对本文所提应用节点频差的失步振荡中心定位方法的可行性进行验证。本节验证主要包括以下几个方面: 传统电网受到扰动导致系统发生同步振荡时, 基于节点电压频差的失步振荡中心定位法可行性分析; 线路发生短路故障导致发电机失步振荡时, 基于节点频差的失步振荡中心定位方法的可行性分析。同时, 本节以三阻抗元件失步保护方法作为对照进行分析。

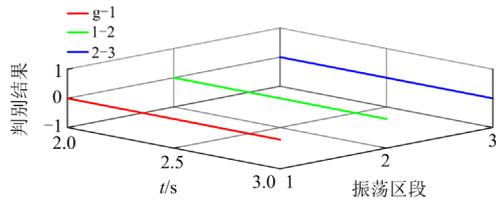
3.1.1 发电机稳定振荡

由于小扰动影响导致系统发生稳定振荡, 发电机功角及相似度系数如图 9(a)所示。该情况下应用节点电压频差的失步振荡中心定位(后文简称频率法)结果如图 9(b)所示。

由图 9(a)可以看出, 稳定振荡时, 发电机功角相似度系数 $r > 0.4$, 不满足式(8)启动判据的要求, 保护不启动。发生稳定振荡时, 阻抗轨迹没有进入三阻抗元件的透镜圆中。由图 9(b)可知, 基于节点频差的失步振荡中心定位法没有定位到失步振荡中心, 输出为 0, 两种方法判别结果一致。仿真结果表明, 本文所提频率法在稳定振荡时没有识别出失步振荡中心的位置, 不会发生误判。



(a) 保护启动判据



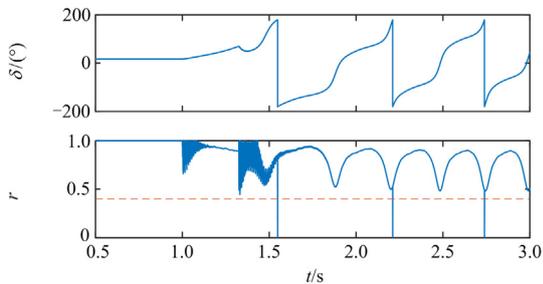
(b) 频率法判别结果

图9 发电机稳定振荡机端阻抗轨迹和频率法定位结果

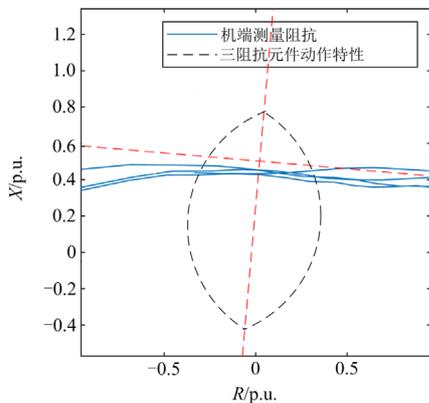
Fig. 9 Impedance trajectory and frequency method positioning results of generator stable oscillation terminal

3.1.2 发电机失步振荡

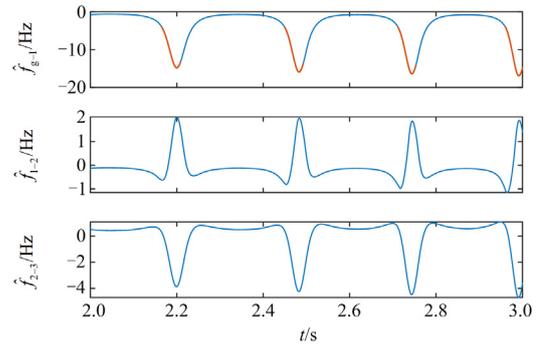
系统发生失步振荡时, 保护启动判据、发电机端阻抗轨迹、基于节点频差的失步振荡中心区段及定位结果如图 10 所示。



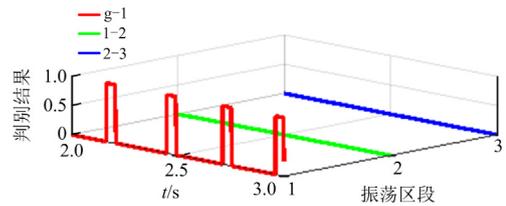
(a) 保护启动判据



(b) 发电机端阻抗轨迹



(c) 振荡中心所在区段定位



(d) 频率法判别结果

图 10 发电机失步振荡机端阻抗轨迹和频率法定位结果

Fig. 10 Impedance trajectory and frequency method positioning results of generator out-of-step oscillation terminal

图 10(a)中的橙色虚线为保护启动判据设定阈值 r_{set} , 其值为 0.4。从图中可以看出, 相似度系数在 $t = 1.549$ s 时满足式(8), 保护判据启动。在 2~3 s 内发电机端阻抗轨迹共穿越透镜圆 4 次, 如图 10(b) 所示, 在该情况下, 发电机失步振荡, 且振荡中心落在发-变组内部。基于节点频差的失步振荡中心定位检测到失步振荡区段如图 10(c)中的橙色区段, 振荡中心位于 g-1 段, 即发-变组内部。经过 0、1 变换后的失步振荡中心判别结果如图 10(d)所示, 将振荡中心所在区段置 1, 其余部分置 0, 与三阻抗元件失步保护定位结果一致。传统电网中受到大扰动导致发电机失步振荡时, 三阻抗元件失步保护与频率法定位失步振荡中心结果分析如表 1 所示。

表 1 频率法定位结果分析

Table 1 Positioning result analysis of frequency method

振荡中心位置	三阻抗元件	频率法	识别结果
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致

由表 1 可知, 三阻抗元件失步保护定位振荡中心位于发-变组内部, 频率法定位振荡中心在 g-1 区间, 也就是发-变组内部, 两种方法定位结果一致。

3.1.3 抗噪性

为验证本文所提保护方案的抗噪能力，考虑较为极端的情况，以发电机失步振荡并加入 20 dB 的随机高斯白噪声为例。在该情况下，本文所提保护仍能可靠启动并准确定位失步振荡中心所在区段，仿真结果如图 11 所示。

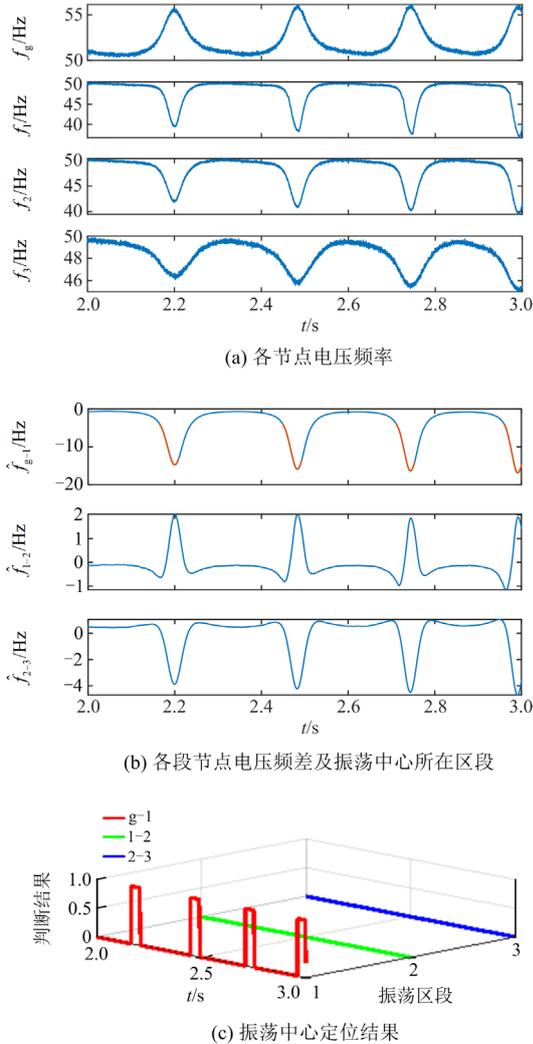


图 11 SNR 为 20 dB 时各节点频差及定位结果
Fig. 11 Each bus frequency difference and positioning results when SNR is 20 dB

图 11(a)为噪声影响下各节点电压频差波形，由于本文基于平滑后的频率进行失步振荡中心定位，具有较好的平滑降噪能力，噪声的存在对定位结果影响较小。噪声影响下失步振荡中心定位区段误差如表 2 所示。

从表 2 可以看出，本文所提方法受噪声干扰较小，能够准确定位失步振荡中心。三阻抗元件失步

保护定位振荡中心位于发-变组内部，频率法定位振荡中心在 g-1 区间，也就是发-变组内部，两种方法定位结果一致。仿真验证表明，本文所提基于节点频差的失步振荡中心定位方法具备良好的抗噪性。

表 2 SNR 为 20 dB 时频率法定位结果分析

Table 2 Frequency method positioning result analysis

when SNR is 20 dB			
振荡中心位置	三阻抗元件	频率法	识别结果
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致
发-变组内部	发-变组内部	g-1	一致

综合对比表 1 和表 2 可知，在不考虑风电接入时，与三阻抗元件失步保护定位方法对比，本文所用频率法能够准确识别振荡中心，同时具有一定的抗噪能力。这验证了频率法理论分析和判据构建的正确性，同时表明其应用至振荡中心定位的可行性。关于风电接入时的适应性和准确性分析将在 3.2 节展开。

3.2 频率法应用于大规模风电接入系统的振荡中心定位

新能源接入系统使得系统的阻抗发生变化，新能源渗透率不同，阻抗变化量也不同。本节在风电渗透率不同的情况下，构建发电机失步振荡的工况，用本文所提方法进行振荡中心定位。

3.2.1 风电渗透率为 12.5%

DFIG 接入系统，其渗透率为 12.5%，故障位置如图 8 所示。由于故障导致系统发生失步振荡，此时发电机功角和相似度系数如图 12 所示。

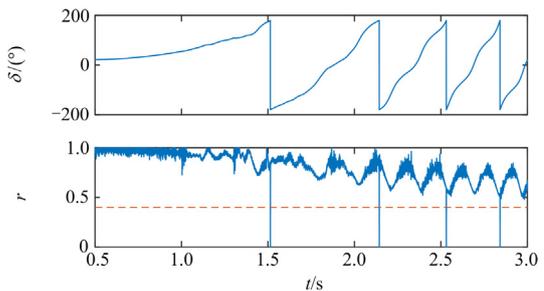
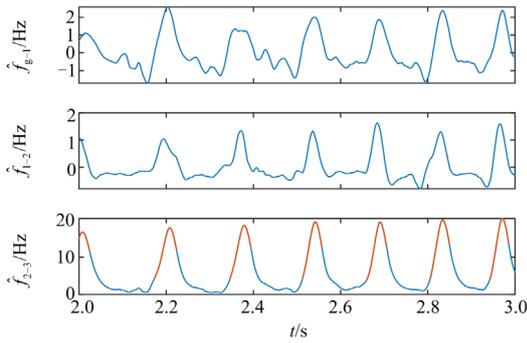


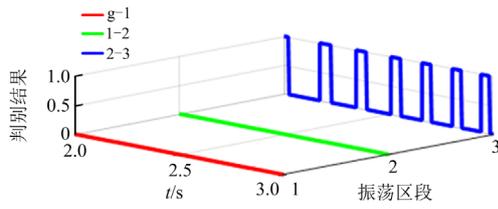
图 12 发电机功角及相似度系数

Fig. 12 Generator power angle and similarity coefficient

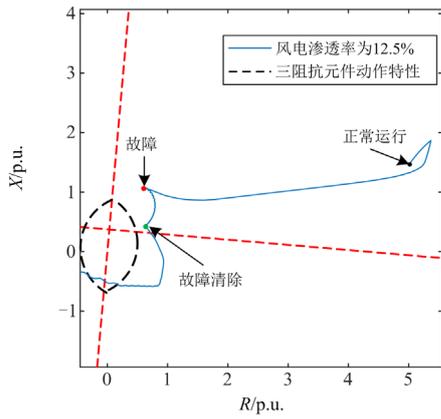
从图 12 可以看出，线路故障导致发电机失步，发电机功角相似度系数于 $t = 1.518$ s 满足式(8)保护启动判据，保护启动。DFIG 渗透率为 12.5% 时系统发生失步振荡，应用本文所提频率法定位故障区间及判断结果，分别如图 13(a)、图 13(b)所示。



(a) 失步振荡中心所在区段



(b) 频率法判别结果



(c) 发电机端阻抗轨迹

图 13 失步振荡中心所在区间及定位结果

Fig. 13 Interval and location results of out-of-step oscillation center

由图 13 可知, 渗透率为 12.5%、发电机失步振荡、振荡中心位于节点 2-3 之间时, 该方法能够准确定位失步振荡中心。同时, 从图 13(c) 可以看出, 风电渗透率为 12.5% 且发生失步振荡时, 发电机端阻抗轨迹快速穿过透镜圆, 不能满足三阻抗元件失步保护对时间的要求, 故保护判据不成立, 不能定位振荡中心所在区段。

3.2.2 风电渗透率为 50%

DFIG 接入系统, 其渗透率为 50%, 发电机失步振荡, 发电机功角及相似度系数如图 14 所示。

由图 14 可知, DFIG 渗透率为 50% 时, 发电机功角相似度系数于 $t = 1.062$ s 满足式(8), 保护启动。

应用本文所提基于节点频差的失步振荡定位法定位结果如图 15 所示。

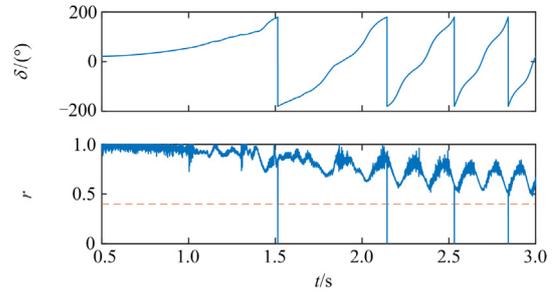
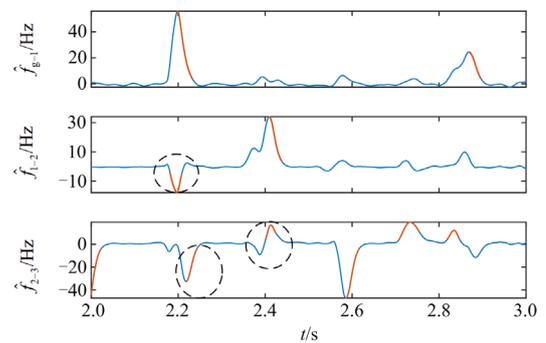
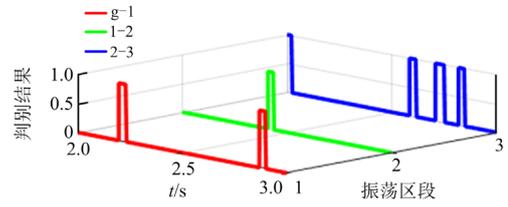


图 14 发电机功角及相似度系数

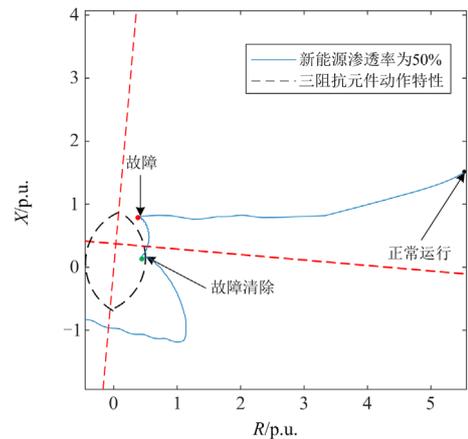
Fig. 14 Generator power angle and similarity coefficient



(a) 失步振荡中心所在区段



(b) 频率法判别结果



(c) 发电机端阻抗轨迹

图 15 失步振荡中心所在区间及定位结果

Fig. 15 Interval and location results of out-of-step oscillation center

图 15(a)中虚线圆标识的部分由于时间未超过 30 ms, 故失步振荡中心识别结果不显示该部分。仿真结果显示, DFIG 渗透率为 50%时, 振荡中心所在区段如图 15(a)所示, 振荡中心定位结果如图 15(b)所示。从图 15 可以看出, 振荡中心首先位于线路 2-3 段, 迁移至线路 1-2 段、发-变组内部 g-1 段, 再迁移至线路 1-2、线路 2-3, 最后位于 g-1 段。在该工况下, 频率法能准确定位失步振荡中心所在位置。同时, 从图 15(c)可以看出, 风电渗透率为 50%且发生失步振荡时, 发电机端阻抗轨迹远离透视镜圆, 应用三阻抗元件失步保护不能定位振荡中心。

3.2.3 渗透率为 50%抗噪性验证

DFIG 接入系统, 风电渗透率为 50%、发电机组失步振荡并加入 SNR 为 20 dB 的随机高斯白噪声时, 应用本文所提基于节点频差的失步振荡定位法定位结果如图 16 所示。

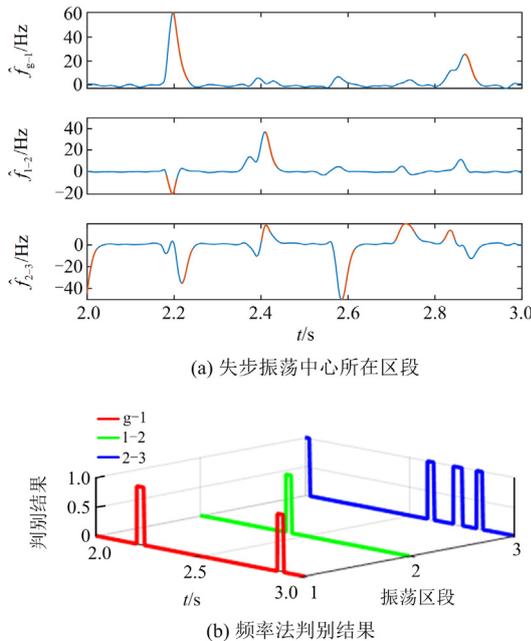


图 16 SNR 为 20 dB 时频率法定位结果

Fig. 16 Frequency method positioning results when SNR is 20 dB

由图 16 可以看出, 风电渗透率为 50%时, 发电机失步振荡的同时受噪声干扰, 本文所提基于节点频差的失步振荡中心定位方法能够准确识别出振荡中心所在区段, 受噪声干扰较小。

综上所述, DFIG 渗透率越大, 发生同种类型的故障时, 发电机失步越快。使用本文所提基于节点电压频差的失步振荡中心定位方法, 在大规模风电接入场景下能够准确定位振荡中心, 不受风电渗透率以及噪声的影响, 弥补了三阻抗元件失步保护在风电接入场景下不能准确识别失步振荡中心的不

足, 为失步保护正确动作创造了条件。

4 结论

大规模风电接入场景下, 系统受到大扰动后功角失稳极易引起发电机失步。因此, 本文针对大规模风电接入引起的发电机失步保护不能正确动作的问题, 以 DFIG 为研究对象, 对电网故障期间的暂态特性进行研究。相关结论如下:

1) 在系统稳定运行时, 风机输出增大, 系统总阻抗增大; 风机输出减小时, 系统总阻抗减小。在同一位置发生同种类型故障时, 风电渗透率越大, 失步时间越短, 失步振荡中心越容易侵入机群。

2) 本文提出基于节点电压频差的失步振荡中心定位方法, 在传统电网中其定位结果同三阻抗元件失步保护法对比, 两种方法定位结果一致, 证明该方法具备可行性, 同时具有一定的抗噪能力。

3) 在大规模风电接入场景下, 通过频率法能够准确定位振荡中心所在区段, 且该方法不受风电渗透率的影响。通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了本文所提方案的有效性。

参考文献

- [1] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [2] 郑涛, 李菁, 颜景娴, 等. 双馈风机短路电流二次谐波产生机理及其对变压器保护的影响[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4808-4816.
ZHENG Tao, LI Jing, YAN Jingxian, et al. Second harmonic generation mechanism of short circuit current of DFIG and its impact on transformer protection[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4808-4816.
- [3] 王增平, 林一峰, 王彤, 等. 电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 10-20.
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 10-20.
- [4] 简学之, 刘子俊, 霍永胜, 等. 计及风机短路电流偏移特性的配电网阻抗幅值差动保护方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(8): 121-129.

- JIAN Xuezhi, LIU Zijun, HUO Yongsheng, et al. An impedance amplitude differential protection method of distribution networks considering short-circuit current deviation characteristics[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(8): 121-129.
- [5] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(5): 403-414.
- YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(5): 403-414.
- [6] 盛四清, 俞可, 张文朝, 等. 大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(6): 82-90.
- SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 82-90.
- [7] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 893-901.
- [8] 徐艳春, 蒋伟俊, 孙思涵, 等. 含高渗透率风电的配电网暂态电压量化评估方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(7): 152-162.
- XU Yanchun, JIANG Weijun, SUN Sihan, et al. Quantitative assessment method for transient voltage of distribution network with high-penetration wind power[J]. *Electric Power*, 2022, 55(7): 152-162.
- [9] 柯贤波, 张钢, 郑力文, 等. 互联电网失步解列过程中的暂态动能变化规律研究[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(11): 111-119.
- KE Xianbo, ZHANG Gang, ZHENG Liwen, et al. Study on the change law of transient kinetic energy in the process of out of step splitting of interconnected power grid[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(11): 111-119.
- [10] 陈汝斯, 李大虎, 周泓宇, 等. 基于梯次启动与优化算法的多集群风机最优调频方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(11): 54-63.
- CHEN Rusi, LI Dahu, ZHOU Hongyu, et al. Optimal frequency regulation in multi-cluster wind turbines using a step start-up and optimization algorithm[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(11): 54-63.
- [11] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]. *电网技术*, 2016, 40(3): 875-881.
- WANG Qing, XUE Ancheng, ZHENG Yuanjie, et al. Impact of DFIG-based wind power integration on the transient stability of power systems[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(3): 875-881.
- [12] GAUTAM D, VITTAL V, HARBOUR T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(3): 1426-1434.
- [13] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15): 3832-3842.
- TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part I: theoretical foundation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(15): 3832-3842.
- [14] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(16): 4043-4051.
- TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems—part II: factors affecting transient angle stability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(16): 4043-4051.
- [15] 杨越, 顾雪平, 王涛. 利用广域测量系统的振荡中心定位及其应用[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(12): 108-114, 136.
- YANG Yue, GU Xueping, WANG Tao. Location and its application of oscillation center using wide area measurement system[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(12): 108-114, 136.
- [16] 张艳霞, 蒙高鹏, 赵冉, 等. 复杂场景下失步中心定位及振荡中心漂移规律[J]. *电网技术*, 2015, 39(8): 2264-2269.
- ZHANG Yanxia, MENG Gaopeng, ZHAO Ran, et al. Locating of out-of-step centre and mechanism of oscillation centre migrating under complicated scenes[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(8): 2264-2269.
- [17] 王乙斐, 吴佳军, 云雷, 等. 基于无功功率捕捉振荡中心的方法研究[J]. *陕西电力*, 2013, 41(5): 21-26.
- WANG Yifei, WU Jiajun, YUN Lei, et al. A new method to capture the oscillation center based on reactive power integral[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2013, 41(5): 21-26.
- [18] 陈恩泽, 唐飞, 刘涤尘, 等. 振荡中心迁移下的电网失步解列策略[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3799-3805.
- CHEN Enze, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Splitting strategy of power systems based on migration of oscillation

- center[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3799-3805.
- [19] 刘福锁, 方勇杰, 李威, 等. 多频振荡下的失步振荡中心变化规律及其定位[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 68-73.
LIU Fusuo, FANG Yongjie, LI Wei, et al. Out-of-step oscillation center change rules and its location under multifrequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 68-73.
- [20] 夏成军, 陈翠琼, 涂亮, 等. 多频振荡下失步解列判据的适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 26-31.
XIA Chengjun, CHEN Cuiqiong, TU Liang, et al. Applicability analysis of out-of-step splitting criteria under multi-frequency oscillation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 26-31.
- [21] 吕熹, 丁剑, 杨明玉, 等. 高频切机措施对失步振荡中心迁移的影响[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 124-130.
LÜ Xi, DING Jian, YANG Mingyu, et al. Influence of over-frequency generator-shedding on out-of-step oscillation center migration[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 124-130.
- [22] 刘奇, 孙鸣, 丁剑, 等. 风电并网对电网失步振荡及解列措施的影响[J]. 可再生能源, 2016, 34(6): 837-845.
LIU Qi, SUN Ming, DING Jian, et al. The influence research of wind power integration on out-of-step oscillation and splitting measure of the northwest power grid[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(6): 837-845.
- [23] 刘佳乐, 唐飞, 廖清芬, 等. 双馈风机接入对电力系统失步振荡中心迁移的影响[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2561-2568.
LIU Jiale, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Impacts of DFIG-based wind power system on out-of-step center migration[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2561-2568.
- [24] 李立新, 曲柏玉, 李旭. 风火打捆外送情形下风电与电网失步解列的交互影响[J]. 分布式能源, 2016, 1(2): 28-34.
LI Lixin, QU Baiyu, LI Xu. Interactive influence between wind farms for wind-thermal-bundled power transmitted system and out of step splitting of power grid[J]. Distributed Energy, 2016, 1(2): 28-34.
- [25] 吕思昕, 申旭辉, 陈得治, 等. 大规模风电并网对宁夏电网失步振荡的影响[J]. 可再生能源, 2015, 33(8): 1135-1141.
LÜ Sixin, SHEN Xuhui, CHEN Dezhi, et al. Study on grid integration of large-scale wind power leading to out of synchronization oscillation of Ningxia power grid[J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33(8): 1135-1141.
- [26] 姜惠兰, 吴玉璋, 周照清, 等. 含双馈风力发电场的多机系统暂态功角稳定性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 999-1005, 1276.
JIANG Huilan, WU Yuzhang, ZHOU Zhaoqing, et al. A method to analyze the transient angle stability of multi-machine system with DFIG-based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 999-1005, 1276.
- [27] 田新首, 王伟胜, 迟永宁, 等. 双馈风电机组故障行为及对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 16-21.
TIAN Xinshou, WANG Weisheng, CHI Yongning, et al. Performances of DFIG-based wind turbines during system fault and its impacts on transient stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 16-21.
- [28] 刘福锁, 方勇杰, 吴雪莲, 等. 失步振荡下瞬时频率特性及振荡中心定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 986-992.
LIU Fusuo, FANG Yongjie, WU Xuelian, et al. Instantaneous frequency characteristics and oscillation center location method for out of step oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 986-992.

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-11-06

作者简介:

李振兴(1977—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: lzx2007001@163.com

崔丹阳(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 1820047173@qq.com

(编辑 魏小丽)