

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190494

一种基于振荡发散速率的次同步振荡风电场精准切机策略

卓毅鑫¹, 李凌¹, 赵成斌², 黄飞鹏¹, 戎子睿², 卢纯颢¹, 李一铭¹, 金能², 林湘宁²

(1. 广西电网电力调度控制中心, 广西 南宁 530023;

2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 大规模风电接入弱交流系统、经高压直流输电线路或带串联补偿的交流输电线路外送时可能诱发电力系统的次同步振荡, 造成大量风机脱网及相关设备的损坏。针对该问题, 通过监测联络线有功功率振荡波形, 并引入一种简单有效的方法来辨识次同步振荡。采用指数函数对次同步振荡的振幅进行拟合, 确定次同步振荡的振荡模式及发散速率, 并设计了振荡发散速率与风电机组切除台数的对应关系。最终, 提出了次同步振荡下风电场三轮切机策略。理论分析和基于 PSCAD 的仿真结果表明所提风电场切机策略能有效抑制次同步振荡, 保障电网的安全稳定运行, 并可在次同步振荡下最大程度保存风电机组, 提升风电消纳能力。

关键词: 风电场; 次同步振荡; 指数函数; 发散速率; 切机策略

A precision wind farm tripping strategy under sub-synchronous oscillation situation based on oscillation divergence rate

ZHUO Yixin¹, LI Ling¹, ZHAO Chengbin², HUANG Feipeng¹, RONG Zirui²,
LU Chunhao¹, LI Yiming¹, JIN Neng², LIN Xiangning²

(1. Guangxi Power Grid Dispatch and Control Center, Nanning 530023, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: That large-scale wind power is connected to weak AC system or transmitted through HVDC transmission lines or series compensated AC transmission lines may induce Sub-Synchronous Oscillation (SSO) of power system, resulting in the disconnection of a large number of wind turbines and the damage of related equipment. To solve this problem, a simple and effective method is introduced to identify SSO by monitoring the oscillation waveform of the active power of the tie-line. The exponential function is used to fit the amplitude of the SSO, and the oscillation mode and the divergence rate of the SSO are determined. The corresponding relationship between the divergence rate of the oscillations and the number of wind turbines tripped is designed. Finally, a three-round wind farm tripping strategy under SSO situation is proposed. Theoretical analysis and simulation results based on PSCAD show that the proposed wind farm tripping strategy can effectively suppress SSO and ensure the safe and stable operation of the power grid. In addition, the wind turbines are preserved to the maximum extent under SSO situation and the wind power utilization capacity is enhanced.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51537003) and Science and Technology Project of Southern China Power Grid Guangxi Power Grid Company (No. GXXJXM20170244).

Key words: wind farm; SSO; exponential function; divergence rate; wind farm tripping strategy

0 引言

在中国, 风力发电量占总发电量的比例逐年攀升^[1-2]。根据《风电发展“十三五”规划》, 到2020

年, 非化石能源占一次能源消费比重重要达到15%, 全国风电年发电量需达到4200亿kW·h^[3-4]。然而, 我国的大型风电场集中于风力资源丰富的华北、东北和西北地区, 但这些地区消纳能力有限, 用电负荷主要集中在东南沿海一带^[5-6], 必须采用风电远距离外送模式, 以消纳风力资源^[7-8]。目前, 大规模风电场一般采用带串联补偿的交流传输或高压直流输

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51537003); 南网广西电网公司科技项目资助(GXXJXM20170244)

电进行风电外送^[9-10]。已有研究指出,大规模的风电接入弱交流系统、由高压直流输电线路或串联补偿后的交流输电线路外送时可能诱发电力系统的次同步振荡^[11-12]。例如,在2009年,美国德州一处风电场经较高串联补偿度接入电力系统后引发了次同步振荡。在我国华北地区也发生了多次风电场经串补线路外送时的次同步振荡现象^[13]。当该电气振荡频率与振荡所在区域的同步发电机轴系某阶固有扭振频率形成拍频时,有可能造成这一电力系统最为昂贵的设备发生不可逆损毁,并进而严重威胁电网的安全稳定^[14-16],这一问题必须从根本上予以解决。

次同步振荡存在发散、稳定和收敛三种模式^[17],对于前两种情况须及时检测,并采取一定的措施消除系统中的次同步振荡,以保障机组及电力系统的安全。目前,已有较多与次同步振荡的模式参数辨识方法相关的研究,主要包括FFT算法、HHT算法、Prony算法以及小波变换分析法等传统的时频分析算法^[18-19]。另外,部分学者还提出了其他优化的次同步振荡辨识方法。文献[20]提出一种基于改进入侵杂草优化IIWO的阻尼正弦原子分解算法,具有良好时频特性且辨识精度高。文献[21]提出一种基于FastICA-MP算法的次同步振荡模式参数辨识,可将噪声信号从观测信号中分离,有效降低了噪声干扰,具有一定的工程意义。文献[22]提出一种广域次同步振荡监测系统的构建方案,可精确有效地检测次同步振荡信息。现阶段对于次同步振荡模式的参数辨识已较为成熟,在检测出发散或稳定的次同步振荡后一般采取主动切除整个风电场的方式,破坏振荡成立条件,从源头上根除振荡,但盲目切除过量机组不仅造成巨大的发电经济损失,且容易造成电网电压问题。为此,文献[23]提出了基于双判据的振荡辨识方法,并根据各风电场站的次同步振荡振幅大小进行多轮切机,这一做法能有效保障次同步振荡下电力系统的安全稳定。然而,次同步振荡的发散速度不一,若仅根据振幅大小进行切机,对于发散速度较快的次同步振荡则需进行多轮切机,延缓了次同步振荡的消除时间。而对于发散速度较慢的次同步振荡,切机数量也无法做到最优。因此,该切机策略无法就不同发散趋势下的次同步振荡进行调整,尚存在一定的优化空间。

针对上述问题,本文基于一种简单有效的次同步振荡辨识判据,对次同步振荡的振幅进行指数拟合,根据拟合参数确定该次同步振荡处于发散、等幅还是收敛的模式。若为发散或等幅模式则进一步确定发散速率,根据发散速率确定切机台数,设计了一种发散速率与切机台数的对应关系。最终提出

了次同步振荡下风电场三轮切机策略:第一轮根据发散速率对相应数目的风机进行切机;一段时间后,再次检测振荡频率和发散趋势及速率,若继续发散则切除剩余风电机组的一半;再经过一段时间后检测,若继续发散则切除所有剩余风电机组。理论分析和基于PSCAD的仿真结果验证了所提切机策略的有效性。

1 双馈风机引发次同步振荡的机理分析

双馈风机(DFIG)引发的次同步控制相互作用主要与风机转子侧变流器控制策略与控制参数有关^[24-25]。如图1所示,转子侧变流器采用dq解耦的双闭环控制策略,其中外环为功率环,内环为电流环。图1中: P_{s_ref} 为有功功率的参考值,来自最大功率追踪环节; Q_{s_ref} 为无功功率的参考值,一般采用恒功率因数运行时设为零; $H_r(s)$ 为转子侧内环电流控制器; $H_r(s)=K_{pr}+K_{ir}/s$, K_{pr} 、 K_{ir} 为其比例和积分系数。

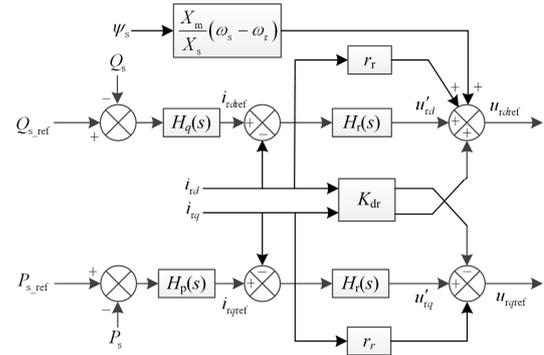


图1 双馈风机转子侧变流器控制框图

Fig. 1 Control block diagram in the converter side of DFIG

为了建立双馈风机的阻抗模型,对其进行如下简化:

- 1) 由于电流内环控制的响应速度远快于外环控制,外环输出可视为恒定;
- 2) 锁相环控制器带宽较窄,其影响主要在基频附近体现;
- 3) 网侧支路在次同步频段的影响较小,忽略不计。

参考文献[9]可知,单台双馈风机的等效阻抗可以表示为

$$Z_{dng}(s) = Z_s(s) + Z_m(s) \parallel Z_r(s) = r_s + sL_s + \frac{sL_m [sL_r + \frac{s}{s-j\omega_t} (r_r + K_{pr} + \frac{K_{ir}}{s-j\omega_l} - jK_{dr})]}{sL_m + sL_r + \frac{s}{s-j\omega_t} (r_r + K_{pr} + \frac{K_{ir}}{s-j\omega_l} - jK_{dr})}$$

式中: Z_s 、 Z_r 、 Z_m 分别为定转子绕组以及励磁阻抗;

s 为微分算子； r_s 、 r_r 、 L_s 、 L_r 分别为定转子电阻和漏感； L_m 为互感； ω_1 、 ω_r 为基准角频率及转子角频率； K_{dr} 为转子侧变流器电流环的交叉项增益。

考虑到 $Z_m(s)$ 通常远大于 $Z_s(s)$ 、 $Z_r(s)$ ，且 $H_r(s)$ 中 K_{pr} 占据主导作用， K_{ir} 和 K_{dr} 在次同步频段内影响很小，可对双馈风机阻抗模型进一步简化。同时，计及风电场多台风机并网，以双馈风电场经串补线路并网系统为例，如图2所示，系统总电阻 R_{sys} 、总电抗 X_{sys} 可表示为

$$\begin{cases} R_{sys} = \frac{r_r + K_{pr}}{nS_{lip}} + \frac{r_s}{n} + r_1 \\ X_{sys} = \omega \left(\frac{L_r + L_s}{n} + L_1 \right) - \frac{1}{\omega C} \end{cases}$$

式中： $S_{lip}=(s-j\omega_r)/s$ 代表滑差在拉普拉斯域的表达形式； n 为风机并网运行机组台数。

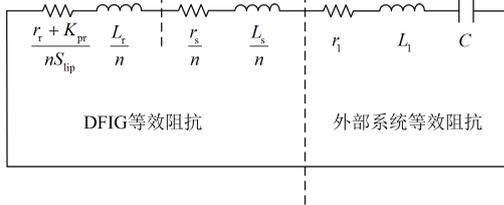


图2 系统简化等效电路模型

Fig. 2 Simplified equivalent circuit model of power system

根据电路原理可知，当系统等效电抗为0时，系统会产生自激现象，此时对应的频率为电气谐振频率，即：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{L_r + L_s}{n} + L_1 \right) C}}$$

由 ω_0 表达式可知，当 n 增大时， ω_0 也随之增大。由于 S_{lip} 与 ω_0 成正相关，故当 n 增大时，等效电阻 R_{sys} 随之减小。当 $R_{sys} < 0$ 时，系统为负阻尼状态，振荡发散。因此，双馈风机引发的次同步控制相互作用与风机台数 n 密切相关， n 越大，系统发生次同步振荡的风险越大。

2 风电场次同步振荡检测方法

文献[26]中给出了一种简单可靠的次同步振荡检测判据：

当发生次同步振荡时，必然能检测到联络线上有功功率的振荡，可以通过检测联络线上有功功率的变化情况来判断是否发生了次同步振荡，振荡检测启动判据如式(1)所示。

$$|P_0 - P_{av}| > P_{set} \quad (1)$$

式中： P_0 为联络线当前检测到的有功功率； P_{av} 为

联络线前5s的平均功率； P_{set} 为启动阈值。当发生次同步振荡时，联络线上有功功率发生周期性变化，判据(1)成立，开始进行振荡检测，具体方法如下。

在振荡检测启动判据成立后，首先记录下联络线有功功率相邻的极大值点 P_{maxk} 、极小值点 P_{mink} ($k \in N^*$ ，下同)及其出现时刻 T_{maxk} 、 T_{mink} 。然后，由式(2)、式(3)求出不同时刻次同步振荡的振荡幅度 A_k 及振荡周期 T_k 。

$$A_k = P_{maxk} - P_{mink} \quad (2)$$

$$T_k = 2(T_{maxk} - T_{mink}) \quad (3)$$

次同步振荡判别式如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{1}{f_{setmax}} < T_k < \frac{1}{f_{setmin}} \\ A_k > P_{set} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $f_{setmax} = 40$ Hz； $f_{setmin} = 10$ Hz； P_{set} 为功率振荡阈值。为避免电力系统中各类扰动导致该判据误判，本文对判据(4)进行优化。

设置振荡次数检测计数器，初始值 $Count = 0$ 。依次检测振荡检测启动判据成立后每一个振荡周期的 A_k 、 T_k 是否始终满足式(4)。若式(4)成立，则 $Count = Count + 1$ ；若式(4)不成立，则 $Count = Count - 1$ 。当 $Count > 3$ 时，判断发生次同步振荡，否则继续检测；当 $Count < -3$ 时，认为此时未发生次同步振荡，检测判据复归，计数器归零。

由上述分析可知，风电场次同步振荡检测流程如图3所示。

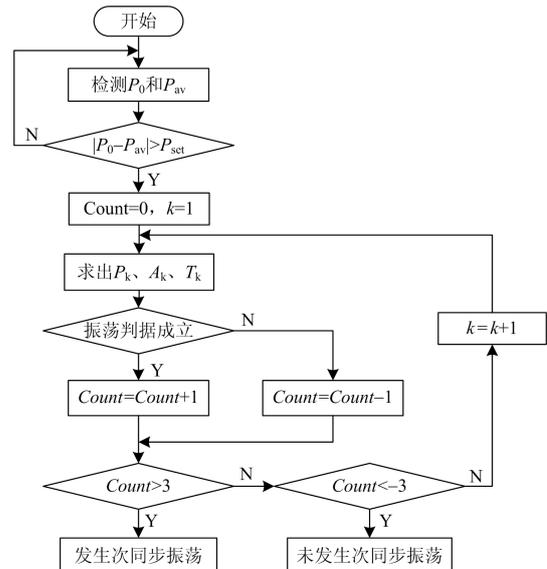


图3 风电场次同步振荡检测流程图

Fig. 3 Wind farm sub-synchronous oscillation detection flow chart

3 次同步振荡下风电场切机策略

3.1 风电场次同步振荡模式及发散速率检测算法

受风电场并网机组台数、风速、本地负荷、系统运行方式变化等因素影响, 次同步振荡可能呈现发散振荡、等幅振荡、收敛振荡三种不同振荡模式, 如图 4 所示。

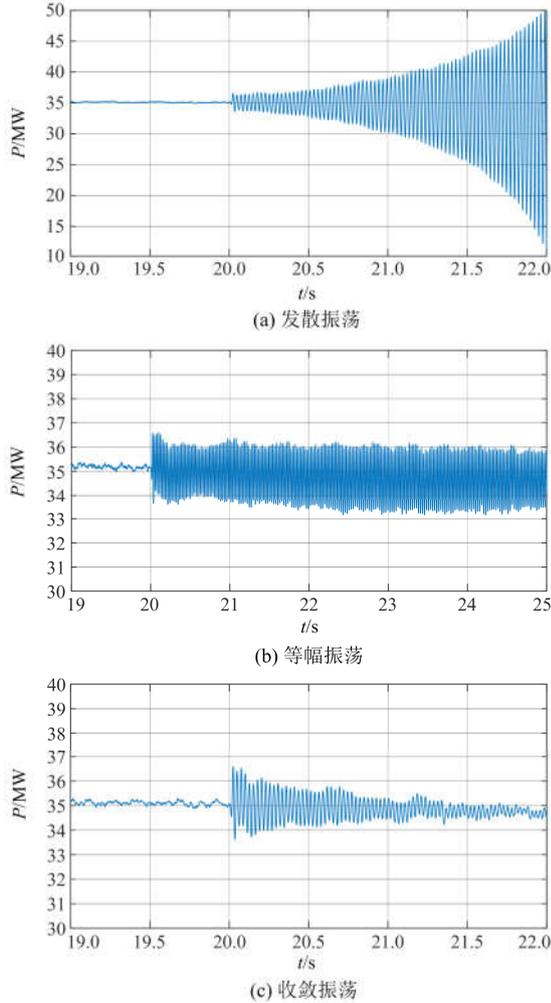


图 4 风电场次同步振荡模式

Fig. 4 Wind farm sub-synchronous oscillation mode

在上述三种不同的振荡模式中, 次同步振荡幅值的变化规律存在差异, 其对电力系统的影响也不尽相同。当发生收敛振荡时, 次同步振荡振幅将在数秒内逐渐衰减为零, 其对电网稳定性影响较小, 无需进行干预; 当发生等幅振荡时, 次同步振荡振幅将保持不变, 其不利影响将随时间线性累积, 故需进行风电切机以消除次同步振荡; 当发生发散振荡时, 次同步振荡振幅将随时间迅速增大, 电网可能在短时间内失稳, 故需在短时间内迅速切除大量

风电机组, 以快速消除次同步振荡。

当检测到发生等幅或发散的次同步振荡后, 当前普遍采用的做法包括“一刀切”及根据各次同步振荡振幅大小进行多轮切机两种方案。其中, 传统的“一刀切”方案虽能保证在较短时间内快速可靠地消除次同步振荡, 但这种以牺牲风电场效益和降低电网稳定性的代价保全常规机组做法, 过于保守, 不到万不得已不宜使用; 根据次同步振荡振幅大小进行多轮切机的方案虽然在一定程度上避免了一次性切除过量风电机组带来的经济损失及电网安全风险, 但这种仅根据振幅大小进行切机的做法无法适配振荡发散程度不一的各种振荡模式, 在响应速度和切机规模方面还有待优化。为保证在快速可靠消除次同步振荡的同时, 尽可能减少风电机组切机台数, 本文基于次同步振荡振幅的发散速度, 提出了一种合理抑制次同步振荡的风电场精准切机策略。

首先, 为准确辨识各种不同类型及发散速度的次同步振荡, 设计次同步振荡模式及发散速率检测算法如下:

利用式(2)计算得到次同步振荡发生后 0.5 s 内的振幅数据 $A_k (k=1,2,3,\dots)$, 并将这一组离散点集记为 A_K , 利用指数函数对 A_K 进行拟合, 如式(5)所示。其中, a, b, c 为对 A_K 进行拟合所得指数函数的各参数。

$$A(t) = a \cdot \exp(bt) + c \quad (5)$$

$$A'(t) = ab \cdot \exp(bt) \quad (6)$$

对式(5)进行求导, 如式(6)所示。经分析可知: 当次同步振荡振幅发散时, 其斜率始终为正, 故式(6)满足系数 $ab > 0$; 当振幅逐渐收敛时, 其斜率始终为负, 故式(6)满足系数 $ab < 0$; 当振荡为等幅振荡时, 其斜率近似为 0, 故式(6)满足系数 $ab \approx 0$ 。

因此, 通过分析离散点集 A_k 拟合所得参数 a, b 的大小及正负关系, 即可准确判断风电场次同步振荡的类型。

3.2 发散速率与切机台数的对应关系

由 3.1 节分析可知, 若采取类似“一刀切”的单轮切机方案, 过切的可能性极大, 为尽可能减少风电机组切机台数, 应采取多轮切机方案。本文设计了一种三轮切机方案: 第一轮切除一定数量的风电机组, 切除的判据将在下面详细讨论; 若振荡继续发散, 则切除剩余风电机组的 50%; 严重情况下, 若第二轮切机后振荡仍继续发散则切除全部剩余风电机组。

为保证尽量缩短次同步振荡抑制时间, 第一轮切机数量的选取至关重要。由 3.1 节分析可知, 利用参数 ab 的大小及正负关系可以较为准确地刻画

振荡的类型及发散速度。当 $ab > 0$ 时，可判断振荡为发散状态，且 ab 越大，发散速度越快，此时可考虑切除较多的风电机组；当 $ab < 0$ 时，可判断振荡为收敛状态，此时无需主动切除风电机组，次同步振荡即可自行消除；当 $ab \approx 0$ 时，可判断此时发生等幅振荡，也应考虑切除一定量的机组。综上，考虑一定的测量和计算误差，本文引入参数 δ ，当参数 ab 位于区间 $[-\delta, \delta]$ 时，判断振荡为等幅振荡；相应地，当参数 ab 分别位于 $[-\infty, -\delta]$ 和 $[\delta, +\infty]$ 区间时，即可判断振荡分别为收敛振荡和发散振荡。当振荡发散时，为兼顾次同步振荡抑制速度及风电场运行经济性，本文设定切机台数随发散速率增加而线性增长。值得注意的是，当振荡发散速度过大时，若次同步振荡在第一轮切机后无法收敛，则其在第二轮切机之前的短时间内将对电网产生严重不利影响，为避免此类情况发生，本文设置振荡发散速度上限为 ab_{max} ，当检测到 $ab > ab_{max}$ 时，立即切除全部风机。

综上所述，设计第一轮切机方案如图 5 所示，其中， δ 、 ab_{max} 等整定值的大小可根据实际系统情况进行设置，振荡发散速率与风机切除台数的对应函数关系将在仿真验证部分给出。

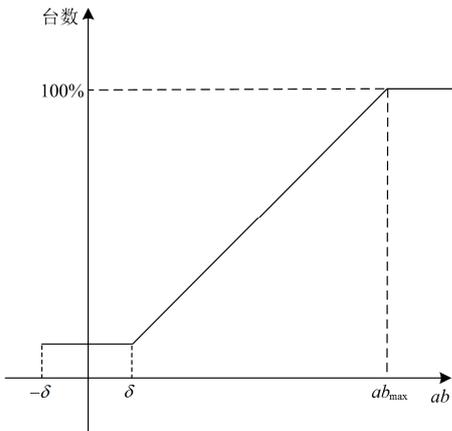


图 5 第一轮切机判据

Fig. 5 First-round wind generator cutting plan

需要指出，关于切机的位置，由于涉及到的因素比较复杂，本文不拟展开讨论。姑且采取以下的判据：切机数量确定之后，对待切机组的实时出力按照由低至高进行排序，优先切除出力较低的机组，以兼顾系统对有功平衡的需求。如各台机组出力一致，则按照到常规火电厂距离由近及远的原则进行切除。

3.3 次同步振荡下风电机组切机策略

结合前述分析，完整的次同步振荡下风电机组综合切机策略如图 6 所示。具体工作流程如下。

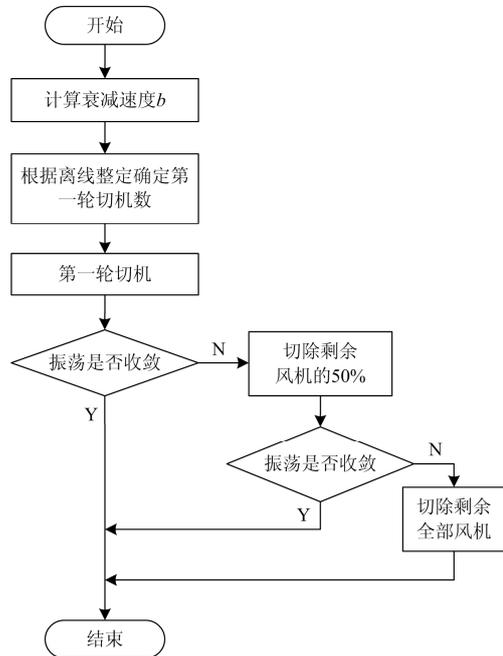


图 6 风电机组综合切机策略

Fig. 6 Wind generator integrated cutting strategy

当次同步振荡检测判断发生了次同步振荡后，开始进入图 6 所示综合切机流程。首先，计算此时次同步振荡的衰减速度，并根据离线整定的发散速率与切机台数的对应关系进行第一轮切机。一定时间后再次检测振荡发散速率，若振荡收敛，则停止切除风电机组，若振荡仍发散，则进行第二轮切机，切除剩余风机的 50%。第二轮切机后经过一段时间再次检测振荡发散速率，若振荡收敛，则不再切除更多机组，若振荡仍发散，则切除剩余全部风机。

4 仿真验证

在 PSCAD 中搭建图 7 所示双馈感应风机并网等值模型。图 7 是一个典型的点对网远距离大容量输电系统，其中风电场包含 67 台型号相同的 1.5 MW 双馈感应风机，它们的控制参数及运行状态一致，通过 35 kV/220 kV 升压变压器 T 连接到 220 kV 母线，并通过 220 kV 输电线路与 200 km 外的电网系统相连，传输线上装有串补度不定的串联补偿电容器(仿真中将通过调整串补度改变振荡发散速率)。图 7 中其余部分重要仿真参数如下：风速 $V_{wind} = 8 \text{ m/s}$ ，线路电阻为 $r_1 = 0.0532 \Omega/\text{km}$ ， $r_0 = 0.184 \Omega/\text{km}$ ，线路电容为 $c_1 = 0.0127 \mu\text{F}/\text{km}$ ， $c_0 = 0.0775 \mu\text{F}/\text{km}$ ，转子侧变流器 PI 参数为 $K_{P1}=0.05$ ， $T_1=0.2145$ ， $K_{P2}=2$ ， $T_2=1.54$ 。

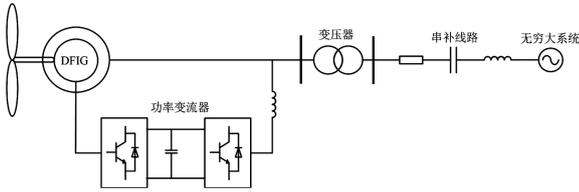


图 7 双馈风电场并网等值模型

Fig. 7 Equivalent model of DFIG-based wind farm integrated into grid

仿真验证时, 图 5 所示第一轮切机方案中取 $\delta = 0.5$, 对应切机 15%; $ab_{\max} = 25$, 对应切机 100%。利用发散速度为 δ 、 ab_{\max} 时对应的切机台数即可计算得到图 3 中振荡发散时的切机台数表达式, 为 $y = 0.03469x + 0.13266$ 。

算例 1: 串补电容 $C = 50 \mu\text{F}$

电网测得的有功功率如图 8 所示, 由式(4)计算可得振荡频率为 22 Hz, 判断发生了振荡。此时, 获取振荡后 0.5 s 内的振荡幅值数据 $A_k (k = 1, 2, 3, \dots)$, 并将这一组离散点集记为 A_k , 对 A_k 进行指数拟合, 可得 $a = 1553$, $b = 0.00676$, $c = -1549$, $ab = 10.5 > 0.5$, 振荡发散。

1) 若按文献[23]所提方案, 即根据次同步振荡振幅大小进行多轮切机, 此时对应第一轮切机数目为 31.1%, 即切除 21 台风机, 仿真结果如图 8 所示。

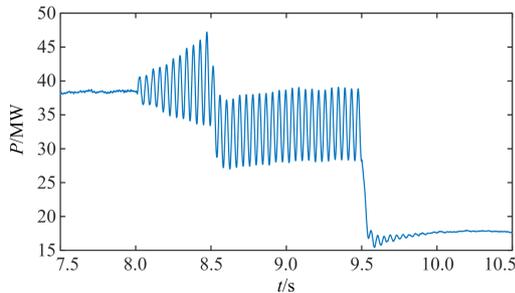


图 8 风机切除对系统影响

Fig. 8 Effect of wind generator cutting on power system

第一轮切机后, 振荡仍未收敛, 故进行第二轮切机, 此时再切除 23 台风机。第二轮切机后, 振荡收敛, 不再进行切机。总共切除了 44 台风机后, 振荡收敛, 保留了 23 台风机。相比传统的“一刀切”方案, 提高了风电场的运行经济性与电网的风电消纳能力, 具有显著优势。

2) 若按本文所提切机方案, 即图 5 所示切机曲线进行切机, 此时对应切机 50%, 即切除 34 台风机, 仿真结果如图 9 所示。

第一轮切机后, 间隔 0.5 s 后再次进行振荡检测及指数拟合, 可得此时 $a = -643.9$, $b = 0.0032$,

$c = 644.8$, $ab = -2.06 < -0.5$, 振荡收敛, 不再进行切机。此时, 经过一轮切机即可消除次同步振荡, 共可保留 33 台风电机组, 与 1) 相比, 切机台数更少且切机速度更快, 具有明显优势。因此, 后续算例中, 均采取本文所提方案进行切机。

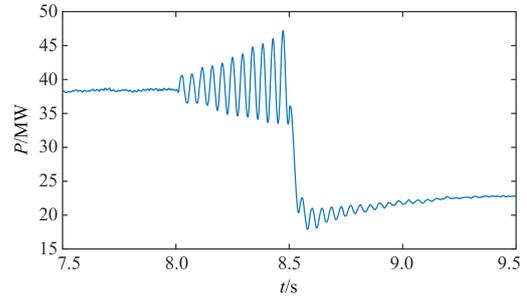


图 9 风机切除对系统影响

Fig. 9 Effect of wind generator cutting on power system

算例 2: 串补电容 $C = 60 \mu\text{F}$

电网测得的有功功率如图 10 所示, 判断发生了振荡。此时, 获取振荡后 0.5 s 内的振幅数据 A_k , 并对其构成的离散点集 A_k 进行指数拟合, 可得 $a = 1.624$, $b = 4.177$, $c = 4.143$, $ab = 6.783 > 0.5$, 振荡发散。

按本文所提方案进行切机, 此时对应切机 36.8%, 即切除 25 台风机, 仿真结果如图 10 所示。第一轮切机后, 间隔 0.5 s 后再次进行振荡检测及指数拟合, 可得此时 $a = -742.6$, $b = 0.0054$, $c = 746.7$, $ab = -4.01 < -0.5$, 振荡收敛, 不再进行切机。此时, 经过一轮切机即可消除次同步振荡, 仅需切除 25 台风机, 保留了 42 台风机。

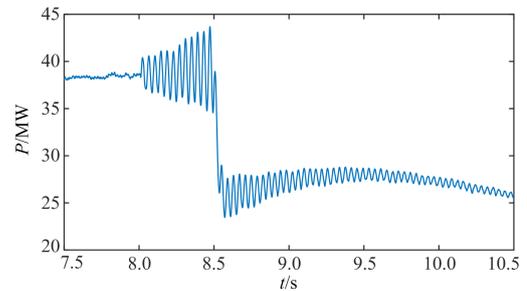


图 10 风机切除对系统影响

Fig. 10 Effect of wind generator cutting on power system

算例 3: 串补电容 $C = 70 \mu\text{F}$

电网测得的有功功率如图 11 所示, 判断发生了振荡。此时, 获取振荡后 0.5 s 内的振幅数据 A_k , 并对其构成的离散点集 A_k 进行指数拟合, 可得 $a = 1.501$, $b = 2.503$, $c = 1.538$, $ab = 3.757 > 0.5$, 振荡发散。

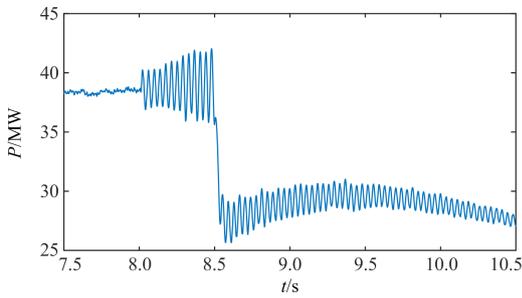


图 11 风机切除对系统影响

Fig. 11 Effect of wind generator cutting on power system

按本文所提方案进行切机，此时对应切机 26.3%，即切除 18 台风机，仿真结果如图 11 所示。第一轮切机后，间隔 0.5 s 后再次进行振荡检测及指数拟合，可得此时 $a=-291.1$ ， $b=0.006$ 11， $c=294.5$ ， $ab=-1.78<-0.5$ ，振荡收敛，不再进行切机。此时，经过一轮切机即可消除次同步振荡，仅需切除 18 台风机，保留了 49 台风机。综合算例 1—算例 3 仿真结果可得，在图 7 所示仿真系统中，当采用本文所提新方案进行切机时，均可以通过一轮切机有效抑制次同步振荡，且振荡发散越慢时，对应切机台数越少。

算例 4：串补电容 $C=100 \mu\text{F}$

电网测得的有功功率如图 12 所示，判断发生了振荡。获取振荡后 0.5 s 内的振幅数据 A_k ，并对其构成的离散点集 A_k 进行指数拟合，可得 $a=-0.789$ 4， $b=-0.047$ 6， $c=2.625$ ， $-0.5<ab=0.038<0.5$ ，振荡为等幅振荡。

按本文所提方案进行切机，此时对应切机 15%，即切除 10 台风机，仿真结果如图 12 所示。第一轮切机后，间隔 0.5 s 后再次进行振荡检测及指数拟合，可得此时 $a=-13$ ， $b=0.043$ ， $c=14.28$ ， $ab=-0.56<-0.5$ ，振荡收敛，不再进行切机。此时，经过第一轮切除 10 台风机即可消除次同步振荡。

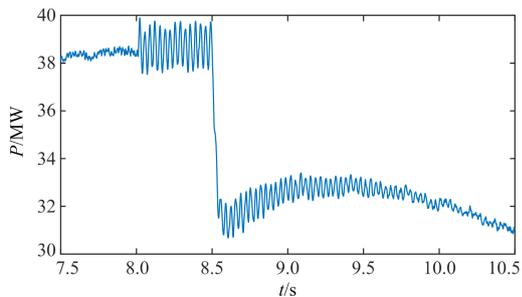


图 12 风机切除对系统影响

Fig. 12 Effect of wind generator cutting on power system

算例 5：串补电容 $C=110 \mu\text{F}$

电网测得的有功功率如图 13 所示，判断发生

了振荡。此时，获取振荡后 0.5 s 内的振幅数据 A_k ，并对其构成的离散点集 A_k 进行指数拟合，可得 $a=-155$ ， $b=-0.011$ ， $c=156.6$ ， $ab=-1.705<-0.5$ ，振荡收敛，无需进行切机。

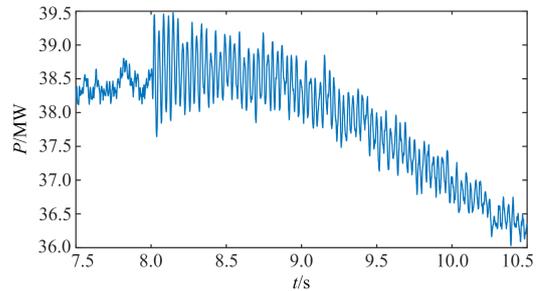


图 13 风机切除对系统影响

Fig. 13 Effect of wind generator cutting on power system

5 结论

针对大规模风电外送时频繁发生的次同步振荡问题，本文引入一种简单有效的次同步振荡辨识方案，并通过指数函数对次同步振荡的振幅进行拟合以判别其振荡模式和发散速率，最终提出了一种能可靠抑制次同步振荡的风电场三轮切机策略。理论分析和 PSCAD 仿真研究表明，相比于“一刀切”及基于振荡振幅大小的切机策略，本文所提切机策略能根据次同步振荡发散速率自动调整切机台数，不仅能快速可靠地消除次同步振荡，同时还最大程度保存了次同步振荡下风电机组数量，提高了风电场经济效益，保障了电网的安全稳定。

参考文献

- [1] 聂永辉, 冯浩然, 于永利, 等. 含风电场的电力系统动态优化潮流[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 15-21.
NIE Yonghui, FENG Haoran, YU Yongli, et al. Dynamic optimal power-flow of power system with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 15-21.
- [2] 江岳文, 陈梅森. 兼顾风电接纳与风电商利益的风电装机容量分层优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 52-59.
JIANG Yuewen, CHEN Meisen. Hierarchical wind-power installation capacity optimization considering grid wind-power accommodation and wind-power supplier's benefit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 52-59.
- [3] 江天天. 含风电接入的电力系统次同步振荡分析与抑制方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
JIANG Tiantian. Research on the method of sub-synchronous oscillation analysis and damping control

- strategy in interconnected power system with wind farm[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [4] 孟航. 双馈风电场并网次同步振荡的机理分析与抑制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
MENG Hang. Mechanism analysis and suppression strategy of grid-connected sub-synchronous oscillation in doubly-fed wind farms[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [5] 高本锋, 张学伟, 李忍. 大规模风电送出系统的次同步振荡问题研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(7): 1-10.
GAO Benfeng, ZHANG Xuwei, LI Ren. Studies of sub-synchronous oscillation in system with large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(7): 1-10.
- [6] 高本锋, 李忍, 杨大业, 等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 11-20.
GAO Benfeng, LI Ren, YANG Daye, et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-20.
- [7] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5, 55.
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5, 55.
- [8] 刘辉, 张磊, 张俊杰, 等. 风-煤互补分布式能源系统热力学特性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(11): 35-39.
LIU Hui, ZHANG Lei, ZHANG Junjie, et al. Thermodynamic analysis of distributed energy system integrated of wind and coal[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 35-39.
- [9] 孙焜, 姚伟, 文劲宇. 双馈风电场经柔直并网系统次同步振荡机理及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6520-6533.
SUN Kun, YAO Wei, WEN Jinyu. Mechanism and characteristics analysis of subsynchronous oscillation caused by DFIG-based wind farm integrated into grid through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6520-6533.
- [10] 张天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 87-92.
- [11] 王倩, 刘辉, 栗然, 等. 大规模风电引发次同步振荡机理及分析方法综述[J]. 华北电力技术, 2014(6): 10-15.
WANG Qian, LIU Hui, LI Ran, et al. Summary about mechanism and mitigation of SSR when wind power connecting grid[J]. North China Electric Power, 2014(6): 10-15.
- [12] 李自明, 姚秀萍, 王维庆, 等. 风电场次同步谐波监测系统的研究与应用[J]. 水力发电, 2017, 43(5): 86-90.
LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Weiqing, et al. Research and application of sub-synchronous harmonic monitoring system for wind farm[J]. Water Power, 2017, 43(5): 86-90.
- [13] 陈晨, 杜文娟, 王灵安, 等. 双馈风电场内部多模式谐振引发电力系统次同步振荡的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 642-651, 944.
CHEN Chen, DU Wenjuan, WANG Ling'an, et al. Mechanism investigation of sub-synchronous oscillations in power systems as caused by multi-modal resonance within DFIG-based wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 642-651, 944.
- [14] 陆静, 吴熙, 杨湘, 等. 基于无功出力调整的双馈风电场次同步振荡抑制策略研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 187-193.
LU Jing, WU Xi, YANG Xiang, et al. Research on suppression strategy of DFIG wind farm based on reactive power regulation for SSO[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 187-193.
- [15] 于笑, 陈武晖. 风力发电并网系统次同步振荡研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 304-312.
YU Xiao, CHEN Wuhui. Review of subsynchronous oscillation induced by wind power generation integrated system[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(4): 304-312.
- [16] 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.
- [17] 柯冬冬. 次同步振荡下汽轮发电机组轴系扭振抑制与保护策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
KE Dongdong. Research on torsional vibration controlling and protection method of turbo-generator under sub-synchronous oscillation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [18] 李宽, 李兴源, 赵睿, 等. 基于希尔伯特—黄变换的次同步振荡检测研究[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 62-66.

- LI Kuan, LI Xingyuan, ZHAO Rui, et al. Subsynchronous oscillation detection based on the Hilbert-Huang transform method[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 62-66.
- [19] 赵妍, 李武璟, 聂永辉. 次同步振荡的频率切片小波变换检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 106-114.
- ZHAO Yan, LI Wujing, NIE Yonghui. A method for subsynchronous oscillation detection using frequency slice wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 106-114.
- [20] 邹红波, 王飞. 经 IWO 优化的原子分解算法辨识次同步振荡模式[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(4): 62-67.
- ZOU Hongbo, WANG Fei. Modal identification of sub synchronous oscillation based on atomic decomposition optimized by IWO[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(4): 62-67.
- [21] 赵兰明, 李宽, 张友泉, 等. 基于 FastICA-MP 算法的次同步振荡模式参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 37-42.
- ZHAO Lanming, LI Kuan, ZHANG Youquan, et al. Parameter identification of subsynchronous oscillation based on FastICA-MP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 37-42.
- [22] 邱衍江, 张新燕, 张超, 等. 新能源汇集地区广域次同步振荡监测系统研究与构建[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 88-94.
- QIU Yanjiang, ZHANG Xinyan, ZHANG Chao, et al. Research and construction of wide-area subsynchronous oscillation monitoring system in new energy influx area[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 88-94.
- [23] 陈军, 王琛, 南东亮, 等. 新能源汇集地区次/超同步振荡监测告警及控制系统研究[J]. 电气技术, 2018, 19(8): 72-76.
- CHEN Jun, WANG Chen, NAN Dongliang, et al. Research on sub/super-synchronous oscillation detecting, alarming and control technology used in the new energy pooling area[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(8): 72-76.
- [24] AMIR O, AMIRNASER Y, RAJIV K V. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.
- [25] 古庭赞, 张羽, 赵阳羊, 等. 适用于电力系统动态分析的双馈式感应风机模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 13-20.
- GU Tingyun, ZHANG Yu, ZHAO Yangyang, et al. Model of doubly-fed induction generator applicable to power system dynamic analysis[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 13-20.
- [26] 刘革明, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136.
- LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

卓毅鑫(1988—), 男, 工学博士, 工程师, 主要从事电力系统分析、运行与控制工作; E-mail: zhuo_yx.dd@gx.csg.cn

李凌(1976—), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统分析、运行与控制工作; E-mail: li_l.dd@gx.csg.cn

赵成斌(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(编辑 葛艳娜)