

DOI: 10.7667/PSPC170755

风火打捆外送系统220 kV 电网次同步振荡监控策略研究

张超¹, 王维庆¹, 王海云¹, 邱衍江¹, 常喜强²

(1. 新疆大学电气工程学院可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 新疆电力公司电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 我国新疆等西北地区采用风火打捆外送系统将电能输送至用电紧缺的地区, 但是由于系统网架结构相对薄弱等特点, 经常发生无规律的次同步振荡。基于以往对风电场群次同步振荡监控策略的研究, 当风电场群次同步振荡发生漏监时, 通过对谐波产生原因及传播路径的分析, 在最佳监控点220 kV 电网处构架了由PMU等装置组建的监视系统, 并提出分轮分级次同步振荡安全控制策略。最后, 将监控策略应用于新疆麻黄沟地区, 通过对振荡前后采样值波形图对比分析, 验证了该策略的可行性。

关键词: 风火打捆外送系统; 次同步振荡; 风电场群; 220 kV 电网; 监控策略

Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system

ZHANG Chao¹, WANG Weiqing¹, WANG Haiyun¹, QIU Yanjiang¹, CHANG Xiqiang²

(1. Engineering Research Center for Renewable Energy Power Generation & Grid-connected Technology of Ministry of Education, School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Power Dispatch and Communication Center, Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830001, China)

Abstract: The electrical energy of Xinjiang province and other northwestern regions in China will be sent to the power shortage areas by using wind-thermal-bundled power transmission system, however, the relatively weak grid structure and other factors often lead to irregular subsynchronous oscillation. Based on the previous research on the monitoring and control strategy of synchronous oscillation of wind farms, when the monitoring and control devices in wind farms don't detect harmonic, and through the analysis of the causes and the propagation path of the harmonic, the monitoring system is established by PMUs and other installations at the best monitoring point-220 kV power grid, and the sequential safety control method is also put forward. Finally, the strategy is applied to the Mahuanggou area of Xinjiang province, and the feasibility of the strategy is verified by comparing the waveforms of the sampled values before and after the oscillation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51667020).

Key words: wind-thermal-bundled power transmission systems; subsynchronous oscillation; wind farms; 220 kV power grid; monitoring and control strategy

0 引言

随着我国现代能源体系加快完善, 风力发电必将成为不可或缺的重要发电方式之一^[1]。风电新能源接入传统火力发电系统的风火打捆外送系统, 也成为西北地区向其他用电紧张地区输电的主要形式^[2]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51667020); 国家电网公司总部科技项目资助“大规模新能源汇集地区次同步谐波监测、分析及控制及时研究”

但由于新能源电源发电机理的不同、输电所采用的电力电子设备等因素都可能会引入次同步谐波, 当引入的次同步谐波频率与发电机轴系自然振荡频率互补时, 将会引发次同步振荡(Subsynchronous Oscillation, SSO)^[3-6]。

目前, 火电机组次同步振荡研究已较为成熟^[7], 但关于风电新能源的次同步振荡产生机理及抑制措施的研究仍处于探索阶段, 特别是风火打捆外送系统中风电次同步振荡成为当前亟需解决的问题。在以往次同步振荡监控策略的研究中, 主要是针对系

统中的风电场群^[8-9],当风电场群中某风机发生次同步振荡时,装置动作以平息振荡。采用此监控策略,可以及时防止事故进一步扩大,但可能会发生漏监现象,导致次同步谐波在电网中扩散。

风电场群次同步振荡发生漏监现象后监控策略不能有效遏制次同步振荡时,通过对新疆地区风火打捆外送系统次同步振荡的产生原因及谐波传播路径的分析,得出 220 kV 电网处为系统中次同步振荡的最优监控点,并于最优监控点处提出相应的监视与安全控制策略,确保能够有效消除次同步振荡对系统的危害。最后以新疆麻黄沟地区发生的次同步振荡案件为例,构架了此地区的监控系统,通过对装置动作前后采样值波形图以及录波数据频谱图进行分析,验证了本文监控策略的正确性。

1 次同步振荡产生及传播

在风火打捆外送系统中,发生次同步振荡会影响系统的正常运行,还可能导致重要负荷脱网、电压异常、直流闭锁等严重后果^[10-11]。必须对次同步振荡进行严格的监控,因此有必要对新能源汇集地区次同步振荡的产生原因、漏监现象以及谐波传播路径做进一步分析。

1.1 次同步振荡原因分析

新疆风火打捆输电系统具有新能源装机容量大、系统较薄弱,网架结构复杂等特点。图 1 是新疆某风火打捆外送系统等值模型图,系统中包含若干风电场、火电厂以及一条特高压直流线路,风电场通过升压变压器 T_1 汇集到 35 kV 汇流母线,该母线一般装设无功补偿设备 SVG。汇流母线经变压器 T_2 升压并与附近的汽轮发电机组共同构成 220 kV 交流系统,最后经变压器 T_3 升压构成风火打捆 750 kV 外送系统。新疆电网产生次同步振荡的主要原因包括以下几种^[12-16]。

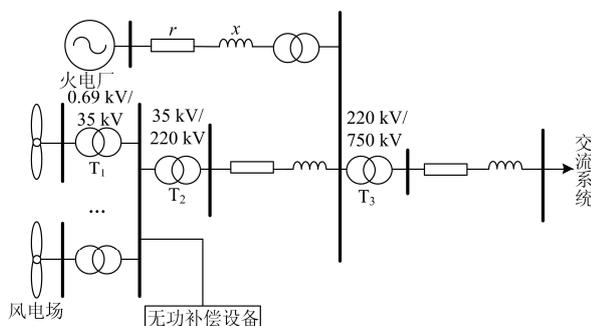


图 1 新疆某风火打捆外送系统等值模型图

Fig. 1 Equivalent model of a wind-thermal-bundled power transmission system in Xinjiang province

1) 风机变流器: 风机变流器控制会产生大幅值的整次谐波以及小幅值的次同步谐波。次同步谐波的频率与机组轴系频率吻合(50 Hz 互补),致使电气-机械谐振发生,即产生了次同步振荡。虽然单机产生的次同步谐波扰动非常小,但是在大规模风电外送基地,大量风机直接相互作用容易产生频率不断变化、幅值较大的次同步谐波。表 1 是某 220 kV 线路电流谐波含量。2) 网架结构: 网架结构复杂、电压等级多、跨度大,交流系统薄弱同样是产生次同步振荡的重要因素。此外,风电等新能源并网以后会加重风电次同步振荡问题。3) SVC、SVG 装置: 在大规模风电新能源基地,配备了大量大容量的无功补偿装置 SVG、SVC,此类装置为 IGBT 快速控制设备,也会产生次同步谐波,加重新能源基地次同步振荡风险。4) 风速: 风力发电与风速密切相关,自然界的风速不停变化,风功率控制单元受风速影响也会产生次同步谐波。

表 1 220 kV 线路电流谐波含量

Table 1 Current interharmonic content of 220 kV line

线路名	22.8 Hz 分量	77.3 Hz 分量	50 Hz 基波	22.8 Hz 含量/%	77.3 Hz 含量/%
线路一	77	87	1 361.2	5.6	6.4
线路二	4.8	4.7	190.2	2.5	2.4
线路三	4.7	4.9	195.8	2.4	2.5
线路四	0.9	1.6	140.3	0.7	1.1
线路五	0.8	1.9	142.4	0.6	1.2

1.2 次同步谐波传播路径

新疆某地区次同步振荡传播路径大致分为四种: 1) 在同一风电场中,次同步谐波由一台风电机组向另一台风电机组传播; 2) 风电机组产生的次同步谐波向风电汇集站传播; 3) 风电机组产生的次同步谐波经风电汇集站与 220 kV 电网向 750 kV 系统扩散; 4) 次同步谐波经 220 kV 电网向另一风电场传播。具体传播路径如图 2 所示。

由传播路径可知,当谐波幅值较大时,风电场和汇集站中的 PMU 及稳控装置动作,抑制次同步振荡,能够满足灵敏性要求。但当幅值较小时,风电场及汇集站监控装置可能发生漏监现象,使得谐波在 220 kV 电网处汇集,叠加后产生幅值较大的谐波信号。根据传播路径可看出 220 kV 电网是新疆电网某地区次同步振荡传播路径点亦是监测控制最优。因此,在 220 kV 电网提出合理的次同步振荡监控策略,能有效抑制谐波扩散。

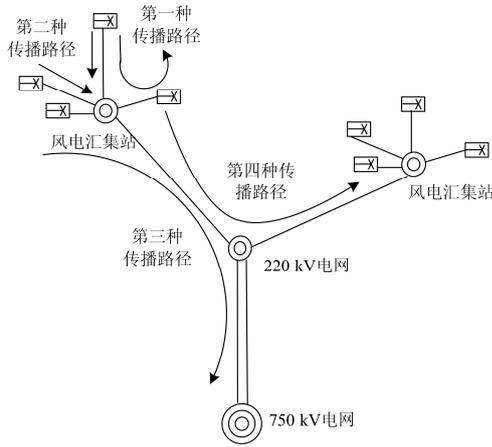


图 2 次同步谐波传播路径示意图

Fig. 2 Propagation path diagram of subsynchronous harmonics

2 220 kV 电网次同步振荡监控

2.1 次同步谐波提取方法

当正弦波分量的频率是原交流信号频率的非整数倍且小于 50 Hz, 称为次同步谐波。目前次同步谐波提取方法主要是基于快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)的加窗插值法, 采用 FFT 必须要选择一个频域特性的窗函数, 以减少频谱泄露以及栅栏效应对参数估计精度的影响。

Nuttall 窗是一种余弦组合窗, 它具有良好的旁瓣性能。本文采用的是 4 项余弦窗 Nuttall 窗的插值 FFT 算法, 此方法能够准确快速得到电网线路振荡的频率、相位、幅值等信息^[17-18]。

以信号 $x(n) = A_m e^{j2\pi(k+r)n/N} R_N(n)$ 为例进行分析。其中, k 为整数, r 为频率偏移量, $r \in (0, 1)$ 。加 Nuttall 窗截断后信号的频谱为

$$X_H(k) = A_m \frac{\sin(r\pi)}{\pi} e^{j\pi} \cdot \frac{11.25}{r(1-r^2)(4-r^2)(9-r^2)} \quad (1)$$

$$X_H(k+1) = A_m \frac{\sin(r\pi)}{\pi} e^{j\pi} \cdot \frac{(-11.25)}{r(1-r^2)(4-r^2)(3-r)(4-r)} \quad (2)$$

式中, $\alpha = (r+3)/(r-4)$, $r = \frac{4\alpha+3}{\alpha-1}$, 可以得到修正复振幅 A_m 和第 k 次谐波的相位 φ_m 为

$$A_m = X_H(k) \frac{r(1-r^2)(4-r^2)(9-r^2)}{11.25 \sin(r\pi)} e^{-j\pi} \quad (3)$$

$$\varphi_m = \text{angle}[X_H(k)] - r\pi \quad (4)$$

现采用如下形式的信号模型进行数值仿真实验, 分析 Nuttall 窗插值 FFT 算法的参数估计误差。

$$I=100 \times \sin(2\pi f_1 + 2\pi f_2) \quad (5)$$

式中: f_1 为工频 50 Hz; f_2 为谐波频率。验证结果如表 2 所示。

表 2 单一频率标准正弦信号检测结果

Table 2 Detection results of single frequency standard

sinusoidal signal		
序号	输入信号频率/Hz	分析结果/Hz
1	15.01	15.0
2	25.09	25.1
3	30.25	30.2
4	65.33	65.3
5	75.08	75.1
6	89.16	89.2

从验证结果可得出频率分辨精度小于 0.1 Hz, 采用 Nuttall 窗的插值 FFT 算法, 当采样 10 周期时, 幅值相对误差一般小于 0.000 1%, 相位相对误差一般小于 0.001%, 比其他算法具有更高的精度。

2.2 次同步振荡监视系统

220 kV 电网处次同步振荡监视系统由支持连续录波功能的同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)、次同步振荡装置、稳控管理系统以及次同步振荡管理系统构成, 系统结构如图 3 所示。其中, PMU 具有延时小、精度高、周期短等优点, 能够实现大范围监测系统的作用, 它将采集的电气量经过计算等环节及时上传, 在监视系统中具有重要作用^[19]。

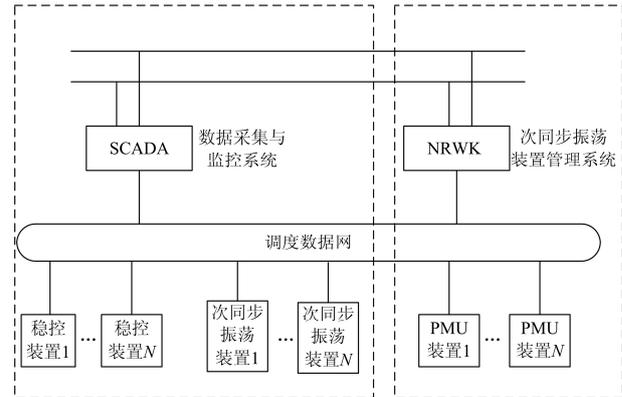


图 3 次同步振荡监视系统结构图

Fig. 3 Description of synchronous oscillation monitoring system

系统工作方式如图 4 所示, 当系统内出现次同步振荡时, 次同步振荡装置输出振荡动作信号。收到振荡动作信号后, 数据采集与监控系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)输出触发信号给次同步振荡管理系统, 随后次同步振荡管理系统召唤读取各采集站的 PMU 装置波形。为后续深入的次同步振荡安全防控措施研究提供了重要基础

数据, 使系统能够可靠动作。

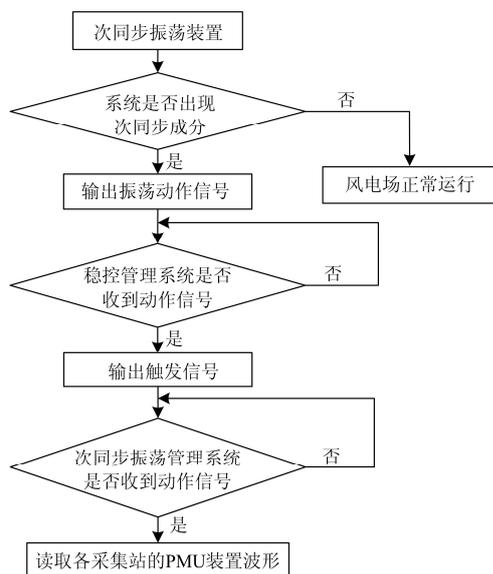


图 4 次同步振荡监视系统工作流程图

Fig. 4 Work flow of synchronous oscillation monitoring system

2.3 次同步振荡安全控制

当系统发生次同步振荡时, 振荡源与邻近区域几乎都存在次同步分量, 判断次同步振荡发生过程并准确计算振荡幅度难度都较大。现阶段, 针对次同步振荡还无有效的控制方法这一现状, 本节提出的控制策略总体原则为: 与次同步振荡监测方法相结合, 当监测到电网中存在次同步振荡且呈现增幅振荡时, 根据线路振荡相对幅度大小, 切除次同步振荡最严重区域, 消除与隔离次同步振荡。

根据前文分析, 当风电场群中的次同步谐波信号不足以使稳控装置动作时, 将不能及时可靠切除振荡源, 可靠性较差。因此, 下文将提出在最佳监控点 220 kV 电网处的次同步安全控制策略。

现选取有功功率为监控量, 当监测到的联络线功率满足启动判据后, 通过振荡幅值和振荡次数判据整定值的配合, 分轮实现对控制系统内各振荡风电场的切除功能, 保证了控制防线的可靠性。装置的启动判据为式(6)^[20]。

$$|P_k - P_{eqv}| > P_{setqd} \quad (6)$$

式中: P_k 为联络线当前功率; P_{eqv} 为联络线前 10 s 的平均功率; P_{setqd} 为启动功率阈值定值。

次同步振荡确认判据如下, 振幅、周期以及计数数据应满足式(7)。

$$dP_k \geq P_{setzd}, T_{setmin} \leq T_k \leq T_{setmax}, N_k \geq N_{setzd} \quad (7)$$

式中: $dP_k = P_{maxk} - P_{mink}$, P_{maxk} 为每个振荡周期联络线有功功率的最大值, P_{mink} 为最小值; $T_k =$

$T_{maxk+1} - T_{maxk}$; P_{setzd} 为振荡确认功率阈值定值; T_{setmax} 为振荡周期的高阈值定值; T_{setmin} 为振荡周期的低阈值定值; N_k 为当前计数数据; N_{setzd} 为起振判别计数器。

当相邻两个周期的振荡幅度比值大于 1.05 时为增幅振荡, 即满足 $dP_k / dP_{k-1} > 1.05$, 此时, 起振判别计数器加 2; 当 $dP_k / dP_{k-1} < 0.95$ 时为减幅振荡, 起振判别计数器减 1; 当相邻两个振荡周期内的振荡幅度不满足增幅振荡与减幅振荡的判断条件则判为等幅振荡, 起振判别计数器加 1。

在 220 kV 电网处监测到的幅值达到起启动值, 则开始计数, 计数达到动作定值后采用分轮分级方法切除风电送出线路。主要思路为: 1) 选取振幅最大的单个风电场出线进行切除, 消除和隔离次同步振荡; 2) 若无法精确定位到风机出线层面, 则对高一电压等级线路相对振幅进行排序, 切除相对振幅较大线路侧的一定比例的风电。为了避免风电的过切, 可重复执行该步骤并对切机比例进行细化。

3 案例分析

在某次同步振荡事件中, 新疆麻黄沟东地区风电场以及汇集站内的次同步振荡幅值较小, 监控装置并未及时动作, 次同步谐波沿输电线路传至 220 kV 电网处并产生了叠加效应, 导致在 220 kV 电网处发生次同步振荡。

图 5 是此地区 220 kV 电网次振荡过程中所监测到的电流和功率原始采样值录波图, 可以看出电流以及功率波形畸变严重, 电流中存在较多的频率分量; 进一步对电流信号进行频谱分析发现, 风电汇集地区出现的次同步波动频率范围较宽, 图 6 是电流原始采样值的频谱分析图, 电流在 7 Hz、25 Hz、30 Hz 等多个频率段都存在分量, 且动态漂移, 最大分量在 30 Hz 左右。

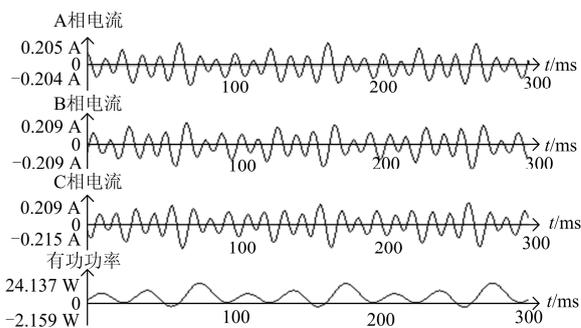


图 5 电流和功率原始采样值波形图

Fig. 5 Original sampling waveform of current and power

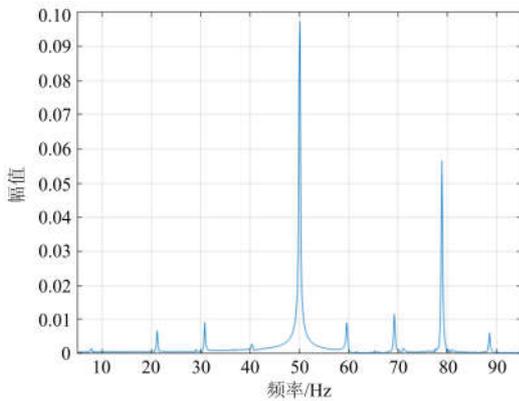


图 6 电流原始采样值频谱分析图

Fig. 6 Frequency spectrum analysis of current original sampling

针对此现象并基于网架结构特点，组建了由麻黄沟功率振荡检测装置等经 2 M 光纤通信共同构成的次同步振荡监控系统，该系统的装置构成简图如图 7 所示。在该系统中，麻黄沟东功率振荡监测装置与山北变功率振荡监测装置监视本站的 220 kV 线路是否发生功率振荡。若发生功率振荡，将控制命令发给麻黄沟东的稳控装置。切麻黄沟地区风电的命令由麻黄沟东在当地执行，切麻黄沟西地区风电的命令由麻黄沟东稳控装置转发到麻黄沟西变电站执行，切淖毛湖地区风电的命令由麻黄沟东稳控装置转发到淖毛湖变电站执行。

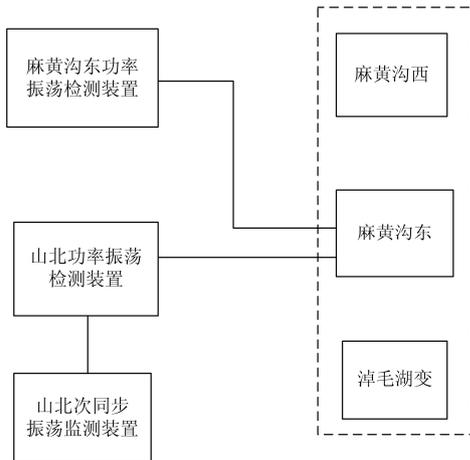


图 7 次同步振荡监控系统装置构成示意图

Fig. 7 Schematic diagram of subsynchronous oscillation monitoring and control system

以麻黄沟东为例详细论述前文提出的分轮分级控制策略，分三轮动作。第一轮：判出本站的 110 kV 或 35 kV 线路满足第一轮动作条件后，切除功率振荡幅比最大的 110 kV 或 35 kV 线路。第二轮：判出山黄线或黄麻线满足第二轮动作条件后，若黄麻线功

率振幅比大于或等于山黄线功率振幅比则全切麻黄沟西风电，否则全切麻黄沟东风电。第三轮：判出山黄线或黄麻线满足第三轮动作条件后，若麻黄沟西未切除，则全切麻黄沟西风电，否则若山黄线在振荡则全切麻黄沟东风电，具体动作策略如表 3 所示。

表 3 麻黄沟东次同步振荡的切机动作策略

Table 3 Control strategy of synchronous oscillation of east Mahuanggou area

线路电压/kV	切机动作策略
220	黄麻线振幅达到动作定值 12 MW，振荡轮次达到 850 次，全切麻黄沟西风电；塘黄线振幅达到动作定值 12 MW，振荡轮次达到 1100 次，全切麻黄沟西、麻黄沟东风电。
110	风电线路振幅达到动作定值(上黄一线、塘黄一线、投黄一线、国黄一线均为 6 MW)，计数达到 600 次，则发令给相应的风电场全切风电馈线。
35	风电线路振幅达到动作定值(12 条 35 kV 风电线路均为 3 MW)，振荡轮次达到 600 次，满足则直接切除相应的风电线路。

根据所述控制策略，当满足 220 kV 电网处稳控装置判断动作条件后，切除 110 kV 风电线路 4 条，35 kV 线路 14 条，损失风电出力约 10 MW。图 8 是控制系统动作前后 220 kV 线路电流与功率波形，各曲线分别是 A 相电流、B 相电流、C 相电流与有功功率，监控系统动作后次同步振荡现象基本消失，电网恢复正常。

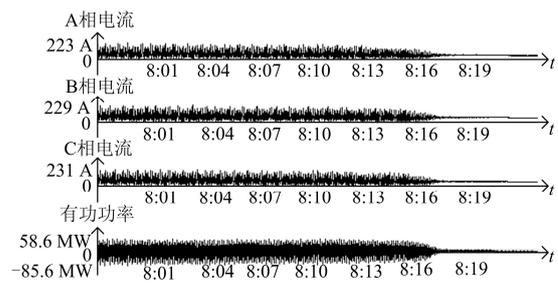


图 8 控制系统动作后振荡平息波形图

Fig. 8 Oscillation elimination diagram after control system action

由麻黄沟东次同步振荡监控实例分析可得出，本文提出应用于 220 kV 电网处的监控策略可靠有效地抑制了次同步振荡。

4 结论

次同步振荡会给电网带来严重危害，因此可靠的监控策略至关重要。本文在风火打捆外送系统 220 kV 电网处提出次同步振荡监控策略，具体结论如下：

1) 以新疆某地区风火打捆外送系统为研究对象,分析了该地区次同步振荡产生原因。针对风电场群及汇集站次同步振荡监控策略可能发生的漏监现象,以谐波传播路径为依据,得出 220 kV 电网处为最佳监控点。

2) 在谐波检测时所采用的是 Nuttall 窗插值 FFT 算法,通过数值仿真实验分析了此法具有较高的准确性。通过在 220 kV 电网处的次同步振荡监视系统以及分轮分级的控制方法,能够有效抑制 220 kV 电网处次同步振荡,并保证了较高的可靠性。

3) 以麻黄沟某次案件为例,当风电场群发生漏监并在 220 kV 电网处产生次同步振荡时,基于本文研究思路构架了该地区 220 kV 电网次同步振荡监控系统。对装置动作前后录波图对比分析表明,该策略能够可靠平息次同步振荡,防止事故进一步扩大,使系统安全稳定运行。

参考文献

- [1] 李景明,王红岩,赵群. 中国新能源资源潜力及前景展望[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 149-153.
LI Jingming, WANG Hongyang, ZHAO Qun. Potential and prospect on new energy source in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(1): 149-153.
- [2] 赛亚勒·阿布都力江,王海云,武家辉. 基于储能装置的风火打捆直流输电系统稳定性研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(2): 203-207.
SAIYALE Abudulijiang, WANG Haiyun, WU Jiahui. Study on transient stability of wind-thermal power HVDC transmission system based on SMES[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(2): 203-207.
- [3] 毕天姝,孔永乐,肖仕武,等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 10-15.
BI Tianshu, KONG Yongle, XIAO Shiwu, et al. Review of sub-synchronous oscillation with large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 10-15.
- [4] 文劲宇,孙海顺,程时杰,等. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-7.
WEN Jinyu, SUN Haishun, CHENG Shijie, et al. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-7.
- [5] 郭小龙,李渝,李珏,等. PMU 装置次同步振荡监测功能扩展的标准讨论[J]. 智能电网, 2016, 4(9): 924-928.
GUO Xiaolong, LI Yu, LI Jue, et al. Discussion on the standard of the subsynchronous oscillation monitoring function on PMUs[J]. Smart Grid, 2016, 4(9): 924-928.
- [6] 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.
- [7] 鹿建成,李啸骢,黄维,等. 基于 SSSC 和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 21-27.
LU Jiancheng, LI Xiaocong, HUANG Wei, et al. Linear optimal controller of static series synchronous compensator and excitation to suppress sub-synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 21-27.
- [8] 吕敬,董鹏,施刚,等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
LÜ Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860.
- [9] 杨培宏,胡庆林,付盼,等. 考虑风速、风向变化及尾流效应的风电场建模[J]. 可再生能源, 2016, 34(5): 692-698.
YANG Peihong, HU Qinglin, FU Pan, et al. The modeling of wind farm considering the changes of wind Speed, wind direction and wake effect[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(5): 692-698.
- [10] 李辉,陈耀君,李洋,等. 双馈风电场并网对汽轮发电机次同步振荡的影响[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(6): 47-54.
LI Hui, CHEN Yaojun, LI Yang, et al. Impact of DFIG-based wind farms interconnected to power grid on subsynchronous oscillation of turbogenerator[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(6): 47-54.
- [11] 时伯年,李树鹏,梅红明,等. 含常规直流和柔性直流的交直流混合系统次同步振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 113-118.
SHI Bonian, LI Shupeng, MEI Hongming, et al. Research on the SSO restraining of hybrid system containing LCC_HVDC and VSC_HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 113-118.
- [12] 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.
- [13] 栗然, 卢云, 刘会兰, 等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3073-3079.
LI Ran, LU Yun, LIU Huilan, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079.
- [14] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [15] 王玉鹏, 安军. 双馈风机的次同步振荡特性与基于虚拟电阻的抑制策略研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(1): 57-63.
WANG Yupeng, AN Jun. Studies on characteristic and suppressing strategies of subsynchronous oscillation with DFIG-based wind power generator[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(1): 57-63.
- [16] 武家辉, 王海云, 王维庆, 等. 混合三端直流输电系统在风火打捆并网中的应用及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 49-55.
WU Jiahui, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. A bundling system of wind-coal power plants and its control strategies based on hybrid MTDC transmissions [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 49-55.
- [17] 许珉, 杨阳, 陈飞, 等. 基于 Nuttall(I)窗的插值 FFT 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 44-48.
XU Min, YANG Yang, CHEN Fei, et al. An interpolated FFT algorithm based on the Nuttall(I) window[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 44-48.
- [18] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-144.
ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-144.
- [19] ZHAO Jinqun, ZHANG Yujie, ZHANG Pan. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI: 10.1186/s41601-016-0013-1.
- [20] 任祖怡, 白杨, 窦乘国, 等. 基于波形检测原理的低频振荡监控装置[J]. 电力设备, 2008, 9(8): 30-32.
REN Zuyi, BAI Yang, DOU Chengguo, et al. Low-frequency oscillation monitoring and control derive based on active power waveform detection[J]. Electrical Equipment, 2008, 9(8): 30-32.

收稿日期: 2017-05-22; 修回日期: 2018-02-02

作者简介:

张超(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: XinJiangJuck@163.com

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

王海云(1973—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(编辑 葛艳娜)