

DOI: 10.7667/PSPC152171

含高渗透率风电的孤网频率动态特性研究

李媛媛¹, 余秀月², 丁剑¹, 陈峰², 宋云亭¹, 于光耀³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350003;
3. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300010)

摘要: 大规模风电集中并网后, 风电近区系统的频率动态稳定性将面临严峻挑战。以实际电网为例, 以现有频率保护配置方案为基础, 仿真模拟了风电近区电网孤网运行时风电机组、常规机组、核电机组高频保护装置的动作情况。分析了各类机组在暂态过程中的差异, 深入研究了近区孤网的频率动态特性, 并提出了适用于风核联合运行工况下的孤网高频保护优化配置方案。该研究成果对大规模风电集中并网近区各类机组频率保护定值的整定具有重要的参考价值。

关键词: 风电集中并网; 频率动态特性; 孤网运行; 频率保护; 高频切机

Study on frequency dynamic characteristics of isolated network with high penetration of wind power

LI Yuanyuan¹, YU Xiuyue², DING Jian¹, CHEN Feng², SONG Yunting¹, YU Guangyao³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350003, China; 3. State Grid Fujian Electric Power Company Electric Power Research Institute, Tianjin 300010, China)

Abstract: After the centralized integration of large-scale wind farms, the frequency dynamic stability of the network nearby will face serious challenges. Based on the existing frequency protection scheme, high-frequency protection equipment action sequence of wind turbines, conventional units and nuclear power plants is simulated for the network near wind farms in isolated operation in actual power grid. The differences between various types of units in the transient process are analyzed, frequency dynamic characteristics of the isolated regional network are studied, and the optimal allocation of high-frequency protection of the isolated network is proposed which is suitable for operating conditions combined with wind and nuclear power. The result is beneficial for protective set value adjustment after the centralized integration of large-scale wind farms.

Key words: centralized integration of wind farms; frequency dynamic characteristics; isolated operation; frequency protection; high frequency generator tripping

0 引言

我国把风能资源的开发利用作为改善能源结构、推动环境保护、保持经济和社会可持续发展的重大举措^[1-2], 2014年我国新增风电装机容量为2 319.6万kW, 风电装机规模累计达1.146亿kW, 居世界第一^[3]。风电接入电网主要有2种方式: 分散接入和集中接入^[4-6]。分散接入主要用于风电开发规模小、以就地消纳为主的情况, 接入电压等级低, 对系统运行影响较小^[7-9]。集中接入主要用于风电开发规模大、以异地消纳为主的情况, 接入电压等级高, 远距离输送, 对系统运行影响较大^[10-12]。

风电规划中常根据风电场分布特点, 将大规模风电集中接入某地区电网, 由于这些地区风电接入

比例较高, 同时存在功率外送, 一旦地区电网与主网解列, 高渗透率的风电机组及剩余功率都将给地区孤网的稳定运行带来极大压力。本文以福建莆田、福清地区电网为研究对象, 以现有频率保护配置方案为基础, 仿真模拟了地区电网孤网运行时风电机组、常规机组、核电机组高频保护装置的动作情况, 分析了各类机组在暂态过程中的差异, 深入研究了地区孤网的频率动态特性, 并提出了适用于风核联合运行工况下的孤网高频保护配置方案, 保障了孤网的安全稳定运行。

1 电力系统频率动态特性

频率是电能质量的一个重要指标, 保证电力系统的频率合乎标准是系统运行调整的一项基本任

仿真中以该地区电网与福建主网 500 kV、220 kV 连接线无故障断开(图中虚线断面)为例进行分析,此时莆田和福清地区 220 kV 电网与主网解列,该区域中风电接入比例较高,但由于地区电网友架结构联系紧密,且孤网内具备常规电源机组,具备较强的事故支撑能力,因此解列后,上述区域孤网面临的主要问题是过剩功率造成的高频问题。下面

将深入研究上述区域电网孤网运行时的频率动态特性和频率保护配置方案。

3 孤网频率动态特性仿真分析

3.1 频率保护配置现状

上述区域电网中低频减载方案、核电及常规机组频率保护配置如表 1、表 2 所示。

表 1 低频减载配置(Hz/s/p.u.)

Table 1 Underfrequency load shedding configuration (Hz/s/p.u.)

轮次	I	II	III	IV	V	VI	特 I	特 II
频率	49.0	48.75	48.5	48.25	48.0	47.5	49.0	48.5
延时	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	20	20
切荷量	0.07	0.044	0.046	0.037	0.036	0.043	0.038	0.036

表 2 机组频率保护配置(Hz/s)

Table 2 Unit frequency protection configuration (Hz/s)

电厂	机组	高频	时限	低频	时限
华能	#1	51.5	5	47.5	10
三期	#2	51.5	7	47.5	12
湄洲湾	#1	51.5	10	47/46.5	10/5
	#2	51.5	10	47/46.5	10/5
江阴	#1	51.5	10	47.5	18
	#2	51.5	12	47.5	12
江热	#1	51.5	10	47.5	18
	#2	51.5	12	47.5	12
福清	#1	51.5	0.1	47.0	3
	#2	51.5	0.1	47.0	3
核电	#3	51.5	0.1	47.0	3
	#4	51.5	0.1	47.0	3

表 4 孤网机组高频保护动作情况

Table 4 High-frequency protection action for units in isolated network

周波	切除机组
43.5	福清核电 1~4#机组, 共计出力 4 600 MW

孤网后由于地区电网有功过剩,造成孤网频率快速升高,首先达到福清核电机组高频保护定值,切除全部核电机组后,孤网频率恢复至 50.1 Hz 左右。该过程中孤网频率动态响应特性如图 3 所示。由上述仿真分析可见,在故障过程中核电机组高频保护动作,但风电机组高频保护由于孤网频率未达到其整定值而未动作。虽然故障后孤网频率能够恢复至稳定范围内,但考虑到风电机组的控制特性较差,且其出力伴随着随机性和波动性,因此从故障后保障孤网稳定运行的角度来看,应将风电机组作为孤网高频切机的优先参与机组,尽量使常规机组保持在电网中,以利于孤网的稳定运行。

通过调研福建电网已投产风电场的机组频率保护配置方案,发现其中较为常用的为以下 3 种频率保护定值,如表 3 所示。

表 3 福建电网现有风机频率保护配置方案统计(Hz/s)

Table 3 Existing frequency protection configuration of wind turbine in Fujian grid (Hz/s)

方案	高频	延时	低频	延时
1	53	0.2	47	0.2
2	52	0	47.5	0
3	51	0.2	47	0.2

仿真中,将分别按照以上 3 种配置方案对风电机组频率保护定值进行模拟,分析其对孤网频率动态特性的影响。

3.2 孤网频率动态特性仿真分析

(1) 方案 1、2

风机频率保护定值按照方案 1、2 配置时,仿真过程中机组高频保护装置动作情况如表 4 所示。

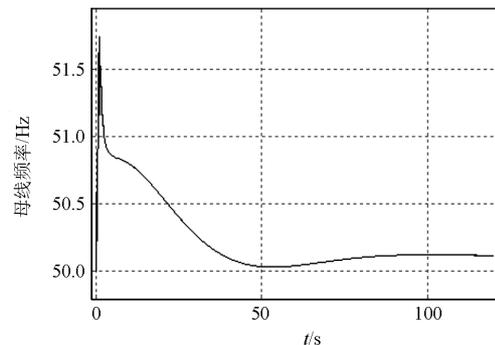


图 3 孤网频率动态响应特性(方案 1、2)

Fig. 3 Isolated grid frequency dynamic response characteristics (scheme 1 & 2)

(2) 方案 3

风机频率保护定值按照方案 3 配置时,仿真过

程中机组高频保护装置动作情况如表 5 所示。

表 5 孤网机组高频保护动作情况

Table 5 High-frequency protection action for units in isolated network

周波	切机切负荷情况
37	高频切除全部风电机组, 共计 2 790 MW
48	高频切除福清核电 1~4#机组, 共计出力 4 600 MW
119~131	低频减载切负荷
132.5	低频切除江阴 2#机组、江热 1#机组, 共计出力 825 MW
136	低频切除江阴 1#机组、江热 2#机组, 共计出力 825 MW

孤网后频率快速升高, 首先达到风电机组高频保护动作定值, 切除全部风电机组 2 790 MW, 由于切机规模较小, 孤网频率继续上升, 达到福清核电机组高频保护动作定值, 切除福清核电厂全部机组 4 600 MW, 此时由于切机规模过大, 造成孤网出现大量有功缺额, 孤网频率快速下降, 触发低频减载装置动作, 并相继触发江阴电厂、江热电厂低频保护动作定值, 切除其全部机组 1 650 MW, 孤网失稳, 无法维持稳定运行。该过程中孤网频率动态响应特性如图 4 所示。

由上述仿真分析可知, 孤网后由于福清核电高频保护动作, 导致全部机组同时切除, 虽然地区电网整体结构保持完整, 但由于福清核电机组容量大, 同时全部退出运行后对系统频率稳定冲击较大, 因此风电并网近区孤网后, 大容量的福清核电机组应尽量保持在电网中。

(3) 高频保护优化配置方案

参考国际原子能机构核电高频运行范围, 核电机组接入电网, 当其机端电压在 0.95~1.05 p.u., 机端频率为 51~52 Hz 时, 可持续运行时间为 5 s。则可知福清核电机组现有高频保护定值设置较为严苛, 存在一定的优化空间, 本文提出的福清核电机组高频保护动作定值初步优化方案如表 6 所示。

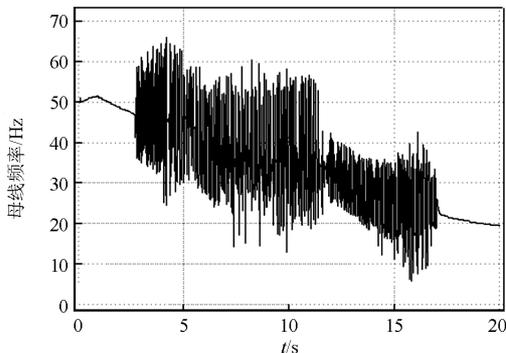


图 4 孤网频率动态响应特性(方案 3)

Fig. 4 Isolated grid frequency dynamic response characteristics (scheme 3)

表 6 福清核电机组高频保护定值优化方案

Table 6 Optimal high frequency protection configuration of Fuqing nuclear power plant

机组	新定值/Hz	新延时/s	原定值/Hz	原延时/s
#1	51.5	0.1	51.5	0.1
#2	51.5	0.1	51.5	0.1
#3	51.5	3	51.5	0.1
#4	51.5	3	51.5	0.1

在风机高频保护定值采取方案 3 的基础上, 按照福清核电机组高频保护定值优化方案, 仿真过程中机组高频保护装置动作情况如表 7 所示。

表 7 孤网机组高频保护动作情况

Table 7 High-frequency protection action for units in isolated network

周波	切机切负荷情况
37	高频切除全部风电机组, 共计 2 790 MW
48	高频切除福清核电 1~2#机组, 共计出力 2 300 MW
576~1000.5	低频减载切负荷 655 MW

孤网后首先达到风电机组高频保护动作定值, 切除全部风电机组 2 790 MW, 由于切机规模较小, 孤网频率继续上升, 达到福清核电 1#、2#机组的高频保护动作定值, 切除 1#、2#机组 2 300 MW, 此时, 由于切机规模过大, 形成过切, 孤网频率下降至 49 Hz 以下, 并触发低频减载装置动作, 动作 2 轮切除 655 MW 负荷后, 孤网恢复稳定运行, 最终恢复频率为 50.5 Hz 左右。该过程中孤网频率动态响应特性如图 5 所示。

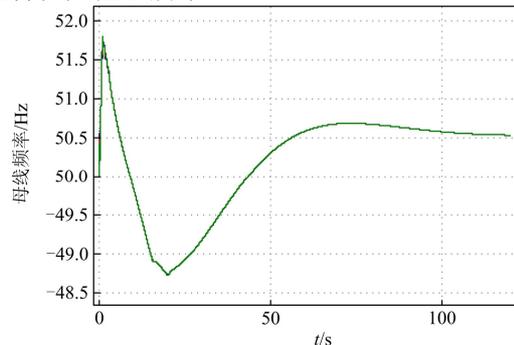


图 5 孤网频率动态响应特性(优化方案)

Fig. 5 Isolated grid frequency dynamic response characteristics (optimal scheme)

4 结论和建议

本文针对大规模风电集中并网后, 风电近区电网的孤网运行工况, 研究了网内风电机组、核电机组及常规机组对孤网频率动态特性的影响。计算结果表明:

(1) 风电集中并网后,当故障导致并网近区电网与主网解列时,该区域电网因功率过剩将面临严重的高频问题,为保障该区域孤网的稳定运行,需合理整定孤网内风电机组、核电机组、常规机组的高频保护动作定值。

(2) 由于风电机组的控制特性较差,且其出力过程伴随着随机性和波动性,因此从故障后保障孤网稳定运行的角度来看,应将风电机组作为孤网高频切机的优先参与机组,尽量使常规机组保持在电网中,以利于孤网的稳定运行。

(3) 风电集中并网后可能使孤网内大容量机组原有的高频保护配置面临严峻挑战,此种情况在孤网内风电、核电联合运行工况下,影响愈加恶劣。由于核电机组保护定值设置较为严苛,且核电机组容量大,同时全部退出运行后对孤网频率稳定冲击较大,某些情况下可能进一步扩大故障后果,因此应在合适范围内调整大容量核电机组的高频保护定值,使其尽量保持在电网中,以利于孤网的频率稳定。在本文所研究的算例和核电高频保护配置优化方案下,孤网能够保持稳定运行。

(4) 鉴于本文的研究是在部分常规机组调速参数为典型参数的条件下开展的,下一步将在收集核电机组实际高、低频耐受范围资料,并补充完整机组实际调速系统参数后,开展核电、风电频率保护整定值的相关优化分析。

参考文献

[1] 董永平,何世恩,刘峻,等. 低碳电力视角下的风电消纳问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 11-16.
DONG Yongping, HE Shien, LIU Jun, et al. Wind power consumption problem in the view of low carbon power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 11-16.

[2] 康重庆,陈启鑫,夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.

[3] 高本锋,刘晋,李忍,等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 154-161.
GAO Benfeng, LIU Jin, LI Ren, et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 154-161.

[4] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的

相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.

ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.

[5] 罗剑波,陈永华,刘强. 大规模间歇性新能源并网控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 140-146.
LUO Jianbo, CHEN Yonghua, LIU Qiang. Overview of large-scale intermittent new energy grid-connected control technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 140-146.

[6] CHEN Zhe. Wind power in electrical distribution systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 1-14.

[7] 李少林,王瑞明,孙勇,等. 分散式风电孤岛运行特性与孤岛检测试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 13-19.
LI Shaolin, WANG Ruiming, SUN Yong, et al. Analysis and experiment research on islanding behaviors and detection strategy for dispersed wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 13-19.

[8] 杨俊友,崔嘉,邢作霞,等. 考虑风电功率预测的分散式风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 8-15.
YANG Junyou, CUI Jia, XING Zuoxia, et al. Reactive power control strategy for dispersed wind farm considering wind power forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 8-15.

[9] 李静,韦巍,辛焕海,等. 基于概率潮流的风电分布式电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 70-76.
LI Jing, WEI Wei, XIN Huanhai, et al. Optimal allocation of wind power distributed generator based on probability power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 70-76.

[10] 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的影响(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832-3840.
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): 3832-3840.

[11] 田书欣,程浩忠,曾平良,等. 基于调频层面的风电弃风分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 18-26.
TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al.

- Analysis on wind power curtailment at frequency adjustment level[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 18-26.
- [12] 廖志刚, 何世恩, 董新洲, 等. 提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 41-46.
- LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.
- [13] 周海锋, 倪腊琴, 徐泰山. 电力系统功率频率动态特性研究[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 58-62.
- ZHOU Haifeng, NI Laqin, XU Taishan. Study on power-frequency dynamic characteristic of power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 58-62.
- [14] 李爱民, 蔡泽祥. 基于轨迹分析的互联电网频率动态特性及低频减载的优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 171-177.
- LI Aimin, CAI Zexiang. Frequency dynamic analysis and load shedding assessment based on the dynamic simulation trajectory of interconnected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 171-177.
- [15] 樊艳芳, 钟显, 常喜强, 等. 频率的时空分布对低频减载的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 55-60.
- FAN Yanfang, ZHONG Xian, CHANG Xiqiang, et al. Research of the UFLS under the frequency characteristics of temporal and spatial distribution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 55-60.
- [16] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
- XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.

收稿日期: 2015-12-25; 修回日期: 2016-02-25

作者简介:

李媛媛(1983-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制、电源接入; E-mail: liyuanyuan2010@epri.sgcc.com.cn

余秀月(1978-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度与运行、电压稳定与控制。

(编辑 葛艳娜)