

# 大规模风电接入对江苏电网调频影响与对策研究

李 强, 袁晓冬, 柳 丹

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘 要:** 针对江苏电网的调频压力, 给出了目前适宜采用的调频措施。结合江苏电网 2015 年、2020 年大规模风电并网的实际情况, 探讨了风电参与系统频率控制的方案, 深入研究了互补能源协调频率控制策略, 提出了风电场频率控制的研究方向。

**关键词:** 大规模风电; 调频; 互补能源

## 0 背景

江苏地区风力资源丰富, 风能资源储量为 3469 万 kW, 可开发区域面积约为 1505km<sup>2</sup>, 可开发量为 177 万 kW。全省风能资源分布自沿海向内陆递减, 沿海及太湖地区风能资源较为丰富, 根据有关资料, 目前江苏沿海的盐城、南通、连云港地区规划建设 34 座大型的陆地或海上风电场, 至 2020 水平年总计容量约 10000MW。

预计在 2015、2020 水平年, 江苏电网正常参与 AGC 调节的 CCS 机组分别约为 160 台、200 台, 合计容量约 6400 万 kW、8000 万 kW, 可调容量约 2640 万 kW、3300 万 kW, 分别占全省统调装机总容量的约 41%和 33%。火电机组调节速度按照每分钟不低于额定容量 2%统计, 2015 和 2020 水平年全省 CCS 机组每 5 分钟的调节能力约为 640 万 kW、800 万 kW。

风电出力波动性较强, 根据历史年(2010-2011 年)风电波动数据的统计分析, 全省风电总出力 5min 内最大上升波动值约为 10.82 万 kW, 最大下降波动值约 13.53 万 kW, 分别占风电总装机容量的 7.07%和 8.84%。至 2015 和 2020 水平年, 全省风电总装机容量分别按 600 万 kW、1000 万 kW 测算, 按照上述波动数值计算, 2015 水平年全省风电总出力 5min 内最大上升、最大下降波动值分别将达 42.42 万 kW、53.04 万 kW, 2020 水平年全省风电总出力 5min 内最大上升、最大下降波动值约 70.70 万 kW、88.40 万 kW。2015 和 2020 水平年风电引起的调频需求约占系统总调节能力的分别为 8%和 11%, 在春节、国庆长假期间, 电网开机方式较小, 风电占系统总调频容量的比例将会显著增加, 风电

波动对电网调频带来的影响将不容忽视。

在 2015、2020 水平年间, 江苏电网新建风电场大多采用双馈感应风力发电机和永磁同步风力发电机等变速风电机组, 变速风电场的接入势必替代常规发电厂, 从而降低常规发电机组的运行比例。变速风电机组通过变频器与电网连接, 其转子转速与电网频率完全解耦, 在电网频率发生改变时机组对系统的惯量没有贡献, 无法参与系统频率控制, 导致系统发生功率缺额时频率偏移较大, 严重时可能导致系统频率越限, 甚至导致系统频率崩溃。

目前, 对大规模风电参与系统调频的研究较少, 论文[1]从小扰动稳定角度进行分析, 文献[2]研究了分布式风电分散自治模式下, 如何兼顾系统调频的需要。论文[3,4]研究了风电出力变化情况下, 对系统调频的影响, 以及对系统备用的要求。论文[5,6]探讨了国外风电参与调频的理论和工程实用情况。但上述文章仅从某一侧面研究而缺乏调频的系统性解决措施。

因此, 本文分析了江苏电网的调频压力, 给出了江苏电网目前的调频措施, 并着重结合大规模风电并网的实际情况, 探讨了风电参与系统频率控制的方案, 深入研究了互补能源协调频率控制策略, 提出了风电场频率控制的研究方向。

## 1 江苏电网调频问题分析

### 1.1 存在的压力

1) 风电对调频的影响: 2020 水平年, 江苏电网风电总装机容量将增加到约 10000MW, 全省风电总出力 5min 内最大上升/下降波动值对电网调频带来的影响已不容忽视; 另一方面, 新建变速风电

场将降低系统的惯量和频率控制能力。

2) 电力供应不足: 2020 年江苏电网电力供应将呈现紧张状态, 尤其是夏季高峰时期, 预计将存在较大的供电缺口。

3) 燃气机组的不确定性: 部分天然气机组发电受气源影响不确定性仍然较大。

4) 区外来电故障的影响: 大功率、远距离区外来电容量逐步增加, 直流闭锁、交流输送通道等故障出现的概率将有所提高。

## 1.2 江苏电网调频措施

1) 提高参与调频机组的比例: 参与调频机组的比例以及各机组的调频性能对调频效果影响较大, 增加参与调频机组的比例, 提高机组一次调频性能将极大改善系统的频率稳定性。

2) 提高机组旋转备用容量: 增加网内机组旋转备用容量, 可提高机组一次调频的调节能力, 增加电网可调功率, 在系统失去区外来电后可提供更多的功率支持, 有助于系统频率恢复到一个较高的水平。江苏电网设置火电机组一次调频负荷调节范围为  $\Delta MW = \pm 3\% \sim \pm 6\%$  机组额定出力, 因此系统提供的一次调频功率有限, 若功率缺额没有足够的发电机功率平衡, 将造成较大的频率下降。为了提高参与一次调频机组的比例, 建议在预留旋转备用容量时, 尽量平均分散在网内各台机组上, 防止部分机组满出力后或者机组一次调频达到上限后不再参与一次调频。

3) 快速调节电源: 燃油/燃气机组有着较好的快速调节能力, 并且其最低出力可以为额定的 30%, 大大低于传统火电机组的 50%-60%, 利用燃油/燃气机组可为系统调频提供支持。

## 2 互补能源协调频率控制

2020 水平年, 在常规调频措施的基础上, 针对江苏电网大规模风电接入后系统, 为了进一步提高江苏电网的频率控制能力, 本项目在常规电厂调频控制的基础上, 研究了风电场和常规电厂的协调频率控制, 并进一步展望了常规电厂、风电场、以及储能装置的协调频率控制, 从而充分发挥常规电厂和风电场的频率控制能力。

### 2.1 常规电厂频率控制

常规电厂完成每个厂内每台机组发电控制, 并确保整个电厂达到调度发送的参考功率水平。每台

机组的发电、估计的可用功率等信息回送给电厂全局控制, 电厂全局控制测量公共连接点频率, 根据功率频率下垂特性曲线, 在系统频率变化时, 增大或减少整个电厂的输出有功功率, 从而使常规电厂参与系统频率控制。常规电厂系统控制如图 1 所示。

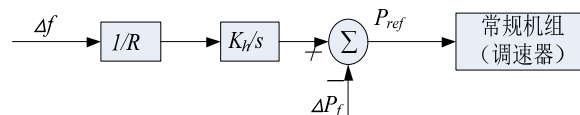


图 1 常规机组频率控制

图中:  $\Delta f$  为电网频差 (频率偏移),  $1/R$  为频差调节系数,  $K_h$  为放大倍数,  $s$  为积分环节,  $\Delta P_f$  为测量到的功率偏移量,  $P_{ref}$  为计算得到的功率参考值。

### 2.2 风电场与常规电厂协调控制

在 2015-2020 水平年间, 江苏电网规划建立多个风电场, 大都采用变速风机机组。通过增设风电场和常规电厂协调频率控制模块, 从而充分利用风电机组的快速性和常规机组的持续性的互补特性, 为系统提供更为有效的频率支撑。电网调度分配中心根据电网运行状态, 并结合风电场以及常规发电机的运行方式和状态, 通过风电场和常规电厂协调频率控制模块协调分配功率参考信号到风电场和常规电厂。在调度分配中充分考虑到基于变速风电机组的风电场调频与常规火电厂惯量反应和频率响应特性的差异, 从而协调分配风电场和常规电厂的功率参考值。

风电场与常规电厂系统控制如图 2 所示。

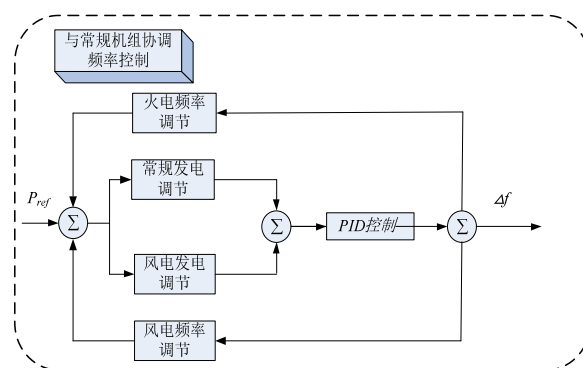


图 2 风电场与常规电厂协调控制

### 2.3 风电场、常规电厂及储能协调控制

储能系统具备向电力系统提供频率控制、快速功率响应等能力。利用储能系统作为风力发电系统的能量缓冲环节, 能够平滑风电场的输出功率, 抑制风电场输出功率波动, 同时实现有功功率调节,

改善系统频率稳定性, 因此开展风电储能系统的互补控制和优化设计具有重要意义。

由于江苏电网风电装机容量占总装机容量的比例较大, 常规机组的备用容量有限, 在某些运行方式下, 无法满足调频的要求。因此将储能设备、常规电厂、以及风电场结合, 构成互补能源系统, 利用储能平滑风电输出功率, 缓解系统调频调峰压力。所设想的协调管理模块如图 3 所示。

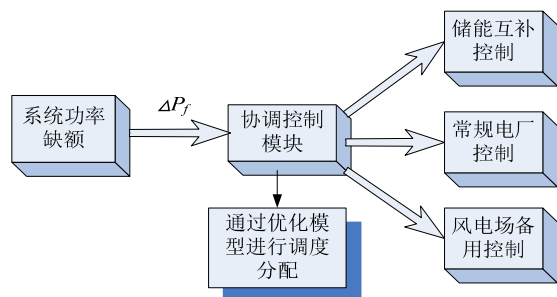


图 3 风电场、储能及常规电厂协调控制

系统的功率缺额可以由储能、常规发电厂或风电场备用功率来弥补, 根据系统运行的经济性, 建立优化管理模型, 对各种功率进行调度分配。

根据风电场本身调频控制的要求, 以及与常规电厂及储能互补协调控制的需要, 调度分配控制参考值到每个风电机组的本地控制, 本地控制对每台单一风力发电机进行控制, 并确保发送的参考功率水平达到整个风电场的要求。

### 3 风电场频率控制策略

针对江苏电网, 提出风电场频率控制策略, 使省网中新建和部分在役风电场能够在一定程度上像常规发电厂一样参与系统频率控制。风电场的频率控制由全局控制层和本地控制层共同完成。全局控制层和本地控制层的控制示意图如图 4 所示。

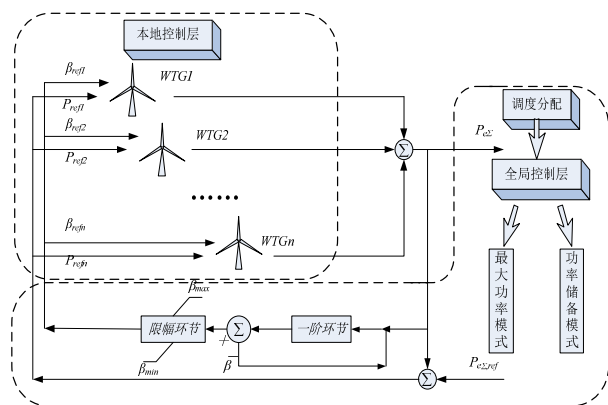


图 4 风电场控制信号调度分配

图中:  $\beta_{ref}$  和  $P_{ref}$  分别为风电场内部各个风电机组

桨距角和输出功率的参考值, 通过对各台发电机的控制能够实现全局控制目标。

#### 3.1 全局控制层/风电场控制层

全局控制层监督、管理整个风电场行为, 决定风电场的控制模式、功率参数、协调风电场与常规电厂的频率控制。全局控制层控制整个风力发电场电力生产, 发送参考值到每个风电机组的本地控制层。

参与频率控制的风电场必须具有一定的运行储备才能更好地参加系统频率控制, 否则仅是瞬时释放叶片中的动能, 提供的频率支撑有限。因此风电场中的风机根据其自身的运行状态, 并结合电网的运行方式, 可以有选择地运行在两种模式下:

1) 最大功率模式: 在该模式下, 通过附加控制环设计, 释放或吸收转子叶片的旋转动能为系统提供短期有功电力支持, 而风电机组本身运行在最大功率追踪模式下, 不能额外增大出力来提供频率支撑;

2) 功率储备模式: 在该模式下, 通过控制桨距角或调整功率-转速最优曲线来减少风机的部分有功输出留作备用功率。当系统出现较大的频率偏差时, 进一步控制桨距角或调整功率-转速最优曲线释放备用功率, 增大风电机组的出力, 像常规机组一样参与系统频率控制。

全局控制层还可对整个风电场的输出功率进行分配, 转换成单个风机的功率参考信号。根据系统操作员要求以及风电场运作状态, 全局控制层计算每个风电机组的参考信号, 决定每个风电机组斜率参数, 调整功率输出速度, 决定是否需要储备容量控制 (平衡控制、功率斜率限制、自动频率控制), 一般按自身容量比例进行功率调整量的初次分配。在功率储备模式时, 风电场必须具备风电机组自身运行信息、合理分配一次备用功率, 以确保系统获得理想的储备。

#### 3.2 本地控制层/风电机组控制层

本地控制层则完成每个单一的风力发电机控制, 并确保达到全局控制层发送的参考功率水平。每个风力发电机组的发电、估计的可用功率、风速等信息回送给全局控制层, 全局控制层测量公共连接点频率, 根据风电场的下垂特性曲线, 在系统频

率变化时,增大或减少整个风电场输出有功功率,从而使风电场像常规电厂一样参与系统频率控制。

本地控制层的每个风力发电机组根据输入风速的大小以及风力机最大和最小功率曲线,取得风力机可调整的功率范围  $P_{mg}$ ,该值也送到风电场控制层,依照  $P_{mg}$ 、风速等自身运行信息,通过功率分配控制模块设定每个风力发电机组的功率  $P_{set}$ ,再加上频率下垂控制产生的功率调整量  $\Delta P$ ,即可得到每个风力发电机组输出功率参考值  $P_{ope}$ 。由风力发电机组输出功率参考  $P_{ope}$ 、风力机最大和最小功率曲线,可获得参考转速  $\omega_{ref}$  和风力机输出机械转矩  $T_{em}$ 。

风力机输出机械功率  $T_{em}$  加上惯性控制产生的惯性效应转矩  $T_{ine}$ ,即为发电机 DFIG 的参考转矩,为了尽量减少对机械驱动链的影响,增加了一阶高通滤波环节,减少功率(转矩)变化率,同时设置转速保护恢复模块,防止调频时转子转速低于最低值  $\omega_{min}$ ,导致转速恢复困难,影响系统稳定。当转速低于  $\omega_{min}$  (设定为  $\omega_{min} = 0.7$ ) 时,转速保护系统启动,不再参与系统频率控制。对于大型风电场所有机组同一时间所有机组都进入转速恢复模式时,提供的有功功率同时减少,可能导致系统频率的二次跌落。因此,为减少转速恢复功能对于有功支撑的削弱,可以采取顺序恢复方法,所有机组按一定延迟时间依次进入转速恢复过程。

## 4 结论与展望

在 2015 年-2020 年间,随着江苏电网风电穿透功率的增加,电网运行调度对风电场调频能力的要求也越来越高,风电场调频控制需在以下几个方面展开深入研究:

1) 协调频率控制策略研究。深入研究风电场、常规发电厂以及新型储能装置之间的协调频率控制策略。

2) 多元复合储能协调频率控制研究。研究具有不同启动时间和不同储能期限的多种储能协调频率控制策略,为系统一次调频、二次调频提供支持,改善系统的频率稳定性。

3) 基于不同并网类型风电场频率控制。随着电力电子技术的发展和高压直流输电技术的成熟,研究基于 CSC-HVDC 或 VSC-HVDC 并网的风电场一次调频控制技术。

江苏省内新建风电场多采用双馈风电机组,因此本项目有针对性地对双馈风电机组的调频特性进行了探索。在此基础上,结合江苏电网实际,对风电场的调频控制,以及风电场与储能装置(以 SMES 为例)协调频率控制进行了探索性的研究和分析。

### 参考文献:

- [1] 李军军, 吴政球. 风电参与一次调频的小扰动稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 1-9.
- [2] 陈宁, 于继来. 兼顾系统调频需求的分布式风电分散自治调控策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 123-130.
- [3] 吴淳. 风电对电力系统调频和备用的影响研究[J]. 华东电力, 2011, 39(6):93-95.
- [4] 韩小琪, 宋璇坤, 李冰寒, 等. 风电出力变化对系统调频的影响 [J]. 中国电力, 2010, 43(6): 26-29.
- [5] 靳丹, 丁坤, 何世恩. 丹麦风电调峰调频机制探讨及对中国的启示[J]. 电力科技与环保, 2011, 27(4): 50-53.
- [6] B. Khaki, M.H. Asgari and R.Sirjan. Contribution of DFIG wind turbines to system frequency control, Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing China: Hohai University, pp. 1-8, 2009.