

# ±500 kV 柔直电网与新能源和常规发电机组的 协调控制研究

王炳辉<sup>1</sup>, 郝婧<sup>1</sup>, 黄天啸<sup>1</sup>, 罗婧<sup>1</sup>, 吴涛<sup>1</sup>, 王晖<sup>2</sup>, 李文锋<sup>2</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

## Study on Coordinated Control of ±500 kV Flexible DC Power Grid With Renewable Generation and Conventional Generators

WANG Binghui<sup>1</sup>, HAO Jing<sup>1</sup>, HUANG Tianxiao<sup>1</sup>, LUO Jing<sup>1</sup>, WU Tao<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, LI Wenfeng<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100045, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Two stations (Zhangbei Station and Kangbao Station) of Zhangbei ±500 kV four-terminal flexible DC power grid are used for gathering renewable energy. They are connected to large-scale wind farms respectively. The other two stations (Beijing station and Fengning station) are connected to main power grid in North China, as energy consumption center and power balance node of the flexible DC grid. Near Fengning station, pump storage units are built to provide power support for the system. Due to the complex structure of the system, severe challenges have been posed for the control of converters, wind turbines and pump storage units. Output of wind farm is intermittent. Voltage of DC grid is highly sensitive to power unbalance. And power quality requirements of energy consumption center is high. In this paper, coordinated generation control strategy of DC converters, wind farms and pump storage units is analyzed. A strategy of V-F control with frequency supplementary control is designed for the converter connected to large scale wind farms. A P-f droop supplementary control is designed for the wind farms to coordinate with converters. And a generation control based on power fluctuation of the AC transmission line is designed for the pump storage units. To illustrate the effectiveness of those strategies, a hardware-in-loop simulation is done on RTDS platform. Simulation results show that, under the condition of fluctuating wind, the converter and the wind farms cooperate to achieve a self-suppression of the overall output of wind farms.

Furthermore, the pump storage units can alleviate the power flow fluctuation of AC system caused by DC grid. The coordinated control strategies promotes a flexible connection among the wind farms, the flexible DC power grid and the AC power grid. As a result, safe and stable operation ability of the whole system is enhanced.

**Keywords:** HVDC transmission; renewable energy; power generation control

**摘要:** 张北±500 kV四端柔直电网工程的送端张北站和康保站作为新能源外送的汇集站, 分别连接大规模风电场群, 受端北京站和丰宁站分别作为新能源消纳中心和柔直电网的功率平衡节点与华北地区交流电网相连接, 丰宁站建有抽蓄机组为系统提供紧急功率支撑。整个工程结构复杂, 风电场群出力间歇性、随机性大, 柔直系统直流电压对多端有功功率的吞吐平衡量敏感性强, 受端负荷中心对电能质量要求高, 这为柔直换流器、新能源风电机组和抽蓄机组的控制提出了严峻挑战。针对三者的协调控制展开研究, 为柔直送端换流器设计了带频率附加控制的V-f控制, 为风电机组引入了以交流系统频率波动量为参考信号的P-f下垂附加控制, 为抽蓄机组设置了以受端交流网线路潮流波动量为参考信号的功率附加控制, 并在RTDS平台上搭建了硬件在环仿真模型进行了验证。仿真结果表明, 在风电场群发生超短期总体出力波动的情况下, 送端换流器和风电机组协同控制实现了风电场群超短期总体出力的自平抑, 同时抽蓄机组参与控制缓解了受端交流电网潮流的波动, 三者协调控制促进了风电场群、柔直电网、受端交流电网三者之间的柔性连接, 提高了系统的安全稳定运行能力。

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2016YFB0900905); 国家电网公司总部科技项目 (520101180002)。

National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900905); Science and Technology Foundation of SGCC (520101180002).

**关键词:** 直流输电; 新能源; 发电控制

## 0 引言

近年来,中国风电发展迅猛,装机容量持续扩大,然而风电出力的间歇性、随机性、远离负荷中心等客观特点,为大规模风电并网消纳和电力系统安全稳定运行带来了严峻挑战。基于电压源型换流器的柔性直流输电技术,因采用全控型IGBT(insulated gate bipolar transistor)元件,无换相失败风险,适应性强、可控性良好,可以实现潮流的快速反转和有功无功的快速解耦控制,为可再生能源的并网、弱系统联网、多端跨区电网互联提供了可行方案<sup>[1-5]</sup>,也有利于远距离风电的并网、传输及消纳。其中采用了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔直换流站,更是以开关损耗小、波形质量高、故障处理能力强的特点和可靠性、灵活性、经济性兼具的优势,受到了高电压大功率多端柔直输电工程的青睐<sup>[6-11]</sup>。中国已成功建成上海南汇两端、广东南澳三端、浙江舟山五端等多个采用MMC换流器的柔直工程,有效解决了海上风电送出问题,大大提高了中国风电资源的利用率。目前在建的张北±500 kV四端柔直电网工程,可将送端张北、康保地区的大规模风电经远距离传输至北京负荷中心,为“低碳冬奥、绿色冬奥”贡献重要力量。

然而在柔直电网中,上送的有功功率和下网的有功功率平衡与否将会引起直流电压的升高或降低,进而影响柔直系统的稳定运行。因此在风电经柔直电网接入交流电网的电力系统中,出力间歇性、波动性、随机性强的风电将会为柔直电网有功功率的平衡和受端交流电网的频率稳定、潮流稳定带来严峻挑战;同时,风电场和交流电网由于柔直电网的物理隔离而解耦,削弱了系统的惯量和阻尼<sup>[3,12-13]</sup>,也使得系统在负荷波动和故障工况下频率变化敏感,这对柔直电网、新能源和常规发电机组的协调控制技术提出了严峻挑战。

目前已有专家针对柔直和常规机组的控制问题展开研究。文献[1]表明了具有较强调峰能力和较快调节速度的水电资源在抑制系统功率波动方面的有效性。文献[12]研究了风电经柔直上网并经传统直流外送的网源协调控制策略,并在风机中引入一次调频特性和惯性控制环节的变功率附加控制参与送端电网频率调节;文献[13]通过利用风机惯性响应和多端柔直有功功率的协调为交流电网频率变化提供支撑。上述文献表明了风电机组参与系统频率调节的能力,但未考虑风电场孤岛运行工况和自身频率波动时系统的协调控

制。文献[14]研究了抽蓄机组的快速阶跃调节功率能力能弥补火电机组爬坡能力的不足,可有效改善电网频率质量。

张北±500 kV柔直电网工程构成了包含大规模风电、抽蓄等多种能源的多端柔直环网,柔直系统的直流电压对多端有功功率的平衡与否敏感性强;送端连接纯新能源大规模风电场群,出力波动性、随机性大;受端北京站对频率稳定性、潮流稳定性、供电连续性等电能质量要求极高。本文以张北柔直工程为例,针对柔直电网、新能源和常规发电机组的协调控制技术展开研究,利用风电机组的调频能力、柔直换流器的控制能力、常规抽蓄机组的快速调节功率能力和三者的协调控制平抑大规模纯新能源风电基地功率波动对系统的冲击和影响,提高系统的安全稳定运行和新能源灵活消纳能力,促进柔直电网和华北地区交流电网的柔性连接。

## 1 柔直电网与新能源和常规发电机组的协调控制

### 1.1 张北±500 kV四端柔直工程简介

作为世界上首个±500 kV多端柔性直流电网工程<sup>[11]</sup>,张北柔直电网工程包含的张北站、康保站、北京站和丰宁站四个MMC型换流站组成了四端环形柔直电网,各端换流站均采用真双极MMC换流器结构,正负极对称接线,四端相互连接呈“口”字型,工程示意图如图1所示。

如图1所示,送端张北站、康保站是纯新能源功率外送的汇集站,分别连接大规模纯新能源风电基地;受端北京站接入华北地区500 kV交流电网,是新能源消纳中心,对电力供应有着频率稳定、潮流稳定、持续不间断等极高的要求;与华北地区500 kV交

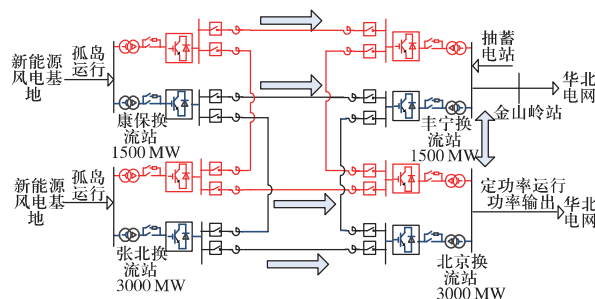


图1 张北±500 kV四端柔直电网工程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Zhangbei ±500 kV four-terminal flexible DC power grid project

流电站——金山岭站相连接的丰宁站是整个柔直电网的功率平衡节点,建有抽蓄机组,拟利用华北地区交流电网的潮流调节和丰宁地区的水能资源抑制柔直送端大规模风电功率波动带来的影响,以减少新能源随机性、间歇性对柔直电网安全稳定性的扰动和冲击。

## 1.2 柔直电网控制技术

柔性直流电网常常采用系统级、换流器级和触发级分层控制的方法提高系统的可靠运行能力<sup>[15]</sup>。根据张北柔直电网工程设计,在系统级控制上采用主从控制,丰宁站为主控站,采用定直流电压控制,平衡整个系统的功率,控制整个柔直电网的电压;北京站为从控站,采用定有功功率控制,在丰宁站因故障退出或者是功率调节达到极限时,转为主控站接管控制系统的直流电压;张北站和康保站运行于孤岛工况下,需要柔直系统为孤岛系统提供稳定的交流电压和频率参考信号,全额汇集纯新能源风电基地上送的功率。

在换流器级控制上,北京站、丰宁站换流器均采用常见的外环控制功率、内环控制电流的双环d-q解耦控制,如图2所示。

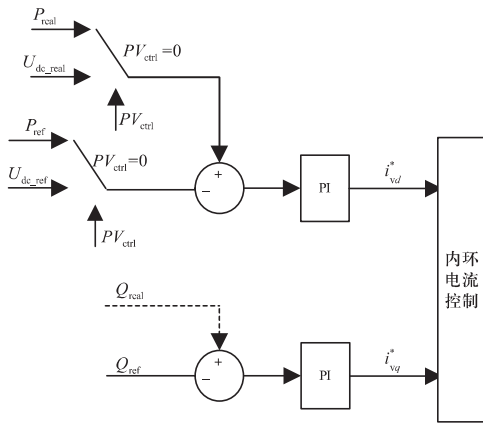


图2 柔直电网受端换流器控制策略

Fig. 2 Control strategy of converter at receiving end of flexible DC power grid

图2中,外环功率控制器根据主从控制信号 $PV_{ctrl}$ 的取值确定本站为主控站或从控站,进而根据有功功率/直流电压和无功功率的参考值计算出内环电流控制器d轴和q轴电流的参考信号 $i_{vd}^*$ 、 $i_{vq}^*$ ,内环电流控制器则一方面跟踪 $i_{vd}^*$ 、 $i_{vq}^*$ ,一方面抑制换流器的内部环流。鉴于目前注入交流电网的无功控制多采用零无功控制方式,本文也暂不考虑柔直电网与交流电网之间的无功电压调节控制。

对于送端张北站和康保站的换流器控制,由于要为孤岛系统提供稳定的交流电压和频率参考信号,因此张北站和康保站换流器均采用定交流电压和定频率控制(即 $V-f$ 控制)。为考虑张北地区和康保地区风电场群出力波动对系统的影响,在其 $V-f$ 控制基础上,分别引入变频率附加控制环节,通过感知风电场群整体出力的变化而调节 $V-f$ 控制的频率参考信号,具体如图3所示。

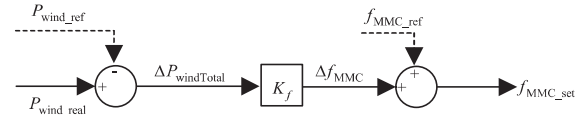


图3 柔直电网送端换流器变频率附加控制技术

Fig. 3 Frequency conversion supplementary control technology of converter at sending end of flexible DC power grid

图3中, $P_{wind\_ref}$ 、 $P_{wind\_real}$ 、 $\Delta P_{windTotal}$ 分别为风电场群上送柔直电网总体出力的目标值、实际值以及二者之间的偏差量; $K_f$ 为送端换流器频率控制的频率调节系数; $f_{MMC\_ref}$ 、 $\Delta f_{MMC}$ 、 $f_{MMC\_set}$ 分别为送端换流器频率控制信号的目标值、调节量和指令值。上述各变量之间的关系如下:

$$\Delta P_{windTotal} = P_{wind\_real} - P_{wind\_ref} \quad (1)$$

$$\Delta f_{MMC} = \Delta P_{windTotal} / K_f \quad (2)$$

$$f_{MMC\_set} = f_{MMC\_ref} + \Delta f_{MMC} \quad (3)$$

## 1.3 风电机组附加频率控制

风机可通过自身的功率—频率下垂特性和惯性特性为系统频率变化提供阻尼<sup>[12,16]</sup>,但鉴于风机惯性调频能力的短时性和有限性<sup>[13]</sup>,本文考虑只将功率—频率的下垂特性引入到风机控制器中,其通过感知直采的系统频率的变化平滑调节风电机组的出力。为使风电场群在具备一定的平抑系统频率波动水平的同时减少不必要的弃风,按照出力相关性将风电场群中一部分机组(A区域)设置运行在最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式下,而另一部分机组(B区域)则引入带死区的功率—频率( $P-f$ )下垂附加控制环节,其参与 $P-f$ 下垂控制时通过预留机组容量运行。当A区域风机出力变化造成系统频率波动达到一定程度时,B区域风机启动 $P-f$ 下垂附加控制响应系统频率变化调节出力,以平抑整个风电场群总体出力的波动,具体控制框图如图4所示。

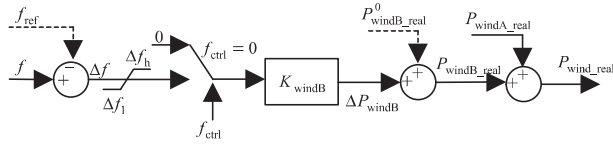


图4 风机附加频率控制技术

Fig. 4 Frequency supplementary control technology of wind turbines

图4中,  $f_{ref}$ 、 $f$ 、 $\Delta f$ 分别为孤岛系统频率的参考值(即50 Hz)、实际值和二者之间的偏差量;  $\Delta f_h$ 、 $\Delta f_l$ 分别为 $P$ - $f$ 下垂附加控制动作死区的上下限阈值, 为避免附加控制频繁动作而设置, 当 $\Delta f$ 超过死区的上下限阈值时, 控制信号 $f_{ctrl}$ 由0阶跃变为1, 附加控制启动;  $K_{windB}$ 为 $P$ - $f$ 下垂附加控制的调节系数, 其值小于0, 表明B区域风机对 $\Delta f$ 有着负调节作用;  $P_{windB\_real}^0$ 、 $P_{windA\_real}$ 、 $\Delta P_{windB}$ 分别为B区域风机响应系统频率波动前后的功率以及该过程中风机功率的调节量,  $P_{windA\_real}$ 为A区域风机的实时功率。上述各变量之间的关系如下:

$$\Delta P_{windB} = K_{windB} \cdot \Delta f \quad (K_{windB} < 0) \quad (4)$$

$$P_{windB\_real} = P_{windB\_real}^0 + \Delta P_{windB} \quad (5)$$

$$P_{wind\_real} = P_{windA\_real} + P_{windB\_real} \quad (6)$$

值得注意的是, 上述过程中各区域风电机组出力不超过其当前时刻理论上能发出的最大功率, 并且不小于其由于出力过小造成脱网时的临界功率, 即:

$$P_{windB\_min} \leq P_{windB\_real} \leq P_{windB\_max} \quad (7)$$

$$P_{windA\_min} \leq P_{windA\_real} \leq P_{windA\_max} \quad (8)$$

#### 1.4 抽蓄机组功率附加控制

当风电场群总体出力波动时, 由于北京站采用定有功控制, 因此风电功率的波动情况通过丰宁站全部实时反馈到丰宁—金山岭线路, 即丰宁—金山岭线路潮流将随着风电场群出力的增减而波动。

丰宁站的抽蓄机组在平抑华北地区交流网潮流波动、为柔直系统提供紧急功率支撑等方面扮演着重要角色。因此以丰宁—金山岭线路潮流的波动量为参考信号, 为丰宁抽蓄机组设计了带死区的功率附加控制, 在丰宁—金山岭线路潮流波动超过一定阈值时, 利用抽蓄机组的快速调节能力平抑丰宁—金山岭线路潮流的波动, 维持交流电网的安全稳定运行。考虑到抽蓄机组发电工况下调节出力时水门连续频繁开启会对机组本身造成一定损耗以及由此带来的经济性的影响, 本文利用丰宁抽蓄机组的阶跃调节能力响应丰宁—金

山岭线路潮流的波动, 具体控制框图如图5所示。

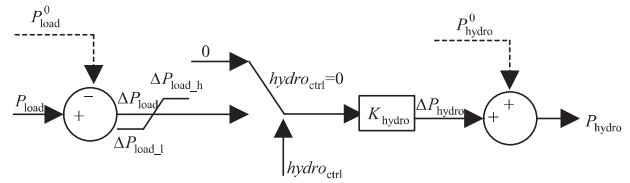


图5 抽蓄机组功率附加控制技术

Fig. 5 Power supplementary control technology of pumping units

图5中,  $P_{load}^0$ 、 $P_{load}$ 、 $\Delta P_{load}$ 分别为丰宁—金山岭线路潮流的初始值、实际值和波动量;  $\Delta P_{load\_h}$ 、 $\Delta P_{load\_l}$ 分别为抽蓄机组功率附加控制动作死区的上下限阈值, 为避免由于风电场群总体出力小幅波动引起附加控制频繁动作而设置;  $hydro_{ctrl}$ 为抽蓄机组功率附加控制信号, 当 $hydro_{ctrl}$ 由0阶跃变为1时, 附加控制启动;  $K_{hydro}$ 为抽蓄机组功率附加控制的功率调节系数, 当 $\Delta P_{load}$ 为正值时取-1, 当 $\Delta P_{load}$ 为负值时取1, 即抽蓄机组对 $\Delta P_{load}$ 有着反向调节作用;  $P_{hydro}^0$ 、 $P_{hydro}$ 、 $\Delta P_{hydro}$ 分别为响应风电场群总体出力波动前后抽蓄机组的功率以及该过程中的阶跃调节量, 并且 $P_{hydro}$ 需满足其在发电工况下的最大功率和最小功率约束:

$$P_{hydro\_min} \leq P_{hydro} \leq P_{hydro\_max} \quad (9)$$

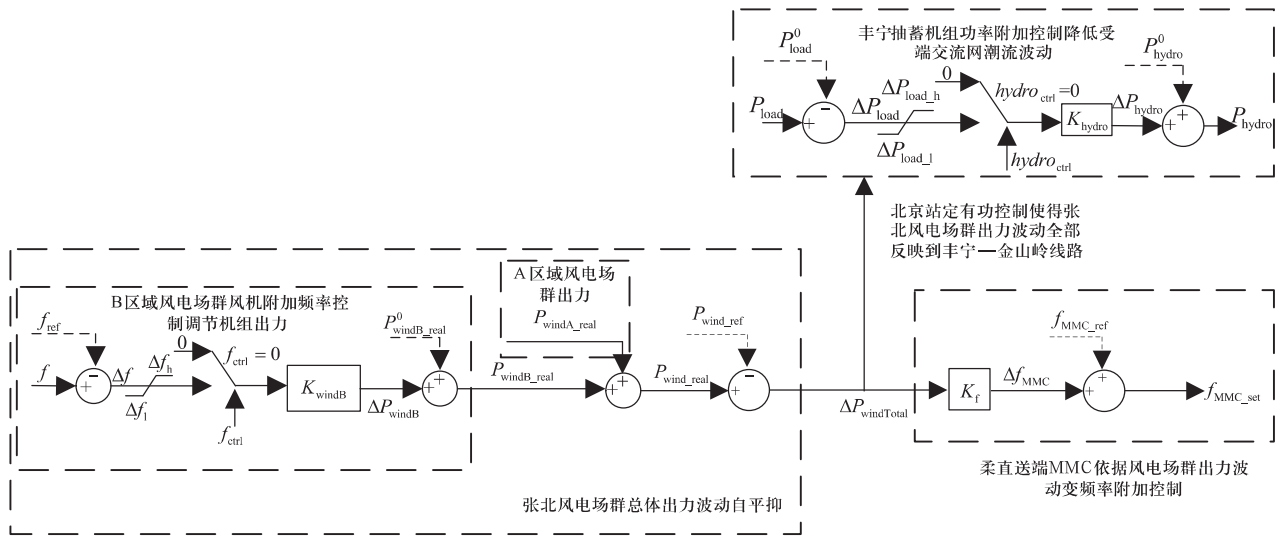
## 2 仿真研究

上述风电机组、柔直电网和抽蓄机组之间的协调控制总框图如图6所示。

为验证上述控制技术的有效性, 本文利用RTDS平台搭建了如图7所示的张北±500 kV四端柔直工程模型, 包含风电机组控制器、抽蓄机组控制器的硬件在环仿真模型, 对风电场群出力总体波动工况下的柔直换流器、风电机组和抽蓄机组的协调控制进行分析研究。

一方面, RTDS根据风电场群总体出力的波动自动调节向孤岛系统提供的交流频率, 风机控制器直采交流系统频率并根据频率偏移量 $\Delta f$ 适时启动 $P$ - $f$ 下垂附加控制, 调整B区域风机出力以平抑风电场群总体出力的波动; 另一方面, 抽蓄机组控制器直采并保持丰宁—金山岭线路初始潮流信号, 当波动量 $\Delta P_{load}$ 达到上下限阈值时, 启动功率附加控制调节抽蓄机组功率以抑制丰宁—金山岭线路潮流的波动。

在RTDS模型中, 丰宁抽蓄电站设置了2台额定容量为300 MW的常规抽蓄机组, 张北、康保纯新能

图6 张北 $\pm 500$  kV四端柔直工程协调控制总框图Fig.6 Coordinated control diagram of Zhangbei  $\pm 500$  kV four-terminal flexible DC power grid project图7 张北 $\pm 500$  kV四端柔直工程硬件在环仿真模型Fig. 7 Simulation model including hardware of Zhangbei  $\pm 500$  kV four-terminal flexible DC power grid project

源风电汇集基地分别设置了总额定容量为3000 MW、1500 MW的风电机群,并将张北风电场群按出力相关性分成总装机容量各为1500 MW的A、B区域,其中张北风电场群B区域参与 $P$ - $f$ 控制时按装机容量10%预留出力。在张北A区域风电场群超短期(0~4 h)输出功率波动情形下,分别针对张北风电场群B区域风电机组和丰宁常规抽水机组均不引入附加控制技术、只有张北风电场群B区域风电机组引入附加控制技术、张北风电场群B区域风电机组和丰宁常规抽水机组同时引入附加控制技术3种工况进行仿真。仿真中设置B区域风电机组 $P$ - $f$ 下垂控制频率死区为0.033 Hz,得到各工况下张北风电场群总体出力 $P_1$ 和丰宁—金山岭线路潮流 $P_2$ 分别如图8和图9所示。

由图8可知,在张北风电场群超短期总体出力随着A区域风电机组出力降低(或增加)而降低(或增加)时,引入了 $P$ - $f$ 下垂附加控制的B区域风电机组和张北站换流器均能够协同控制相应增加(或降低)B区域风电机组的输出功率,从而平抑了张北风电场群超短期总体出力的波动程度。

由图9可知,丰宁—金山岭线路潮流随张北风电

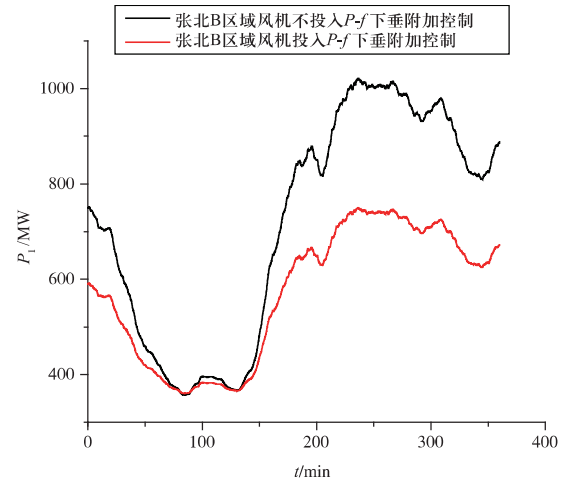


图8 不同工况下的张北风电场群总体出力

Fig. 8 Total output of Zhangbei wind farms under different operating conditions

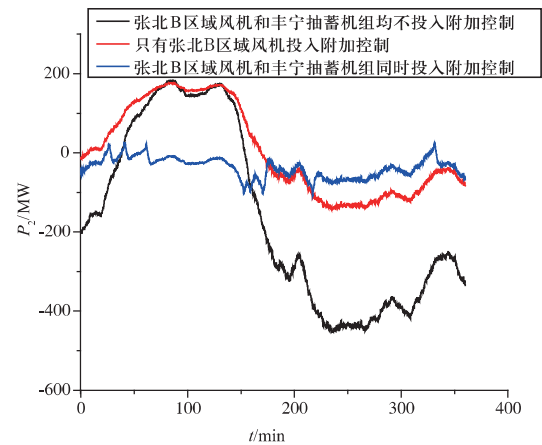


图9 不同工况下的丰宁—金山岭线路潮流

Fig. 9 Power flow of Fengning-Jinshanling line under different operating conditions

场群总体出力波动而变化。当张北风电场群超短期总体出力波动时,引入了 $P$ - $f$ 下垂附加控制的B区域风电机组通过调节其机组功率有效缓解了丰宁—金山岭线路潮流的波动程度;当同时为丰宁常规抽蓄机组引入功率附加控制后,抽蓄机组在丰宁—金山岭线路潮流波动达到其功率控制动作上下限门槛值时启动附加控制迅速降低或增加出力,进一步抑制丰宁—金山岭线路潮流的波动,使其趋于平滑;二者相互配合有效降低了柔直电网有功功率的不平衡程度,从而减少了华北交流电网潮流的调节,大大提高了受端交流系统的供电质量和系统的安全稳定运行能力。

### 3 结论

本文以张北±500 kV柔直工程为例,对柔直电网、新能源和常规发电机组的协调控制进行了研究,为柔直送端换流器设计了带频率附加控制的 $V$ - $f$ 控制、为新能源风电机组引入了 $P$ - $f$ 下垂附加控制、为常规抽蓄机组设置了功率附加控制,利用RTDS平台建立了硬件在环模型并进行了仿真验证。仿真结果表明,在风电场群发生超短期总体出力波动时,送端换流器和风电机组能够协调控制调节风电机组输出功率,实现了风电场群超短期总体出力的自平抑,有效降低了风电场群超短期总体出力的随机性和波动性;常规抽蓄机组能够响应由风电场群总体出力变化引起的交流电网线路潮流的波动,并有针对性地增减出力,与风电机组相互配合降低了柔直电网有功功率的吞吐不平衡程度和受端交流电网潮流的波动程度,提高了受端负荷中心的电能质量和供电可靠性。尽管参与功率—频率下垂控制的风电场会由于无法满出力运行而造成一定的经济损失,但其通过与柔直换流器、受端常规机组的协调控制促进了风电场群、柔直电网、交流电网三者之间的柔性连接和友好互动,提高了系统的整体安全经济运行水平。

### 参考文献

- [1] 周密,徐箭,孙元章.多端柔性直流电网平抑风电波动的协调控制策略[J].电力自动化设备,2016,36(12):29-35.  
Zhou Mi, Xu Jian, Sun Yuanzhang. Coordinated Control Restraining Wind Power Fluctuation of VSC-MTDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12):29-35(in Chinese).
- [2] 江浩,孙瑜,刘辉,等.风电经柔性直流输电系统接入电网研究综述[J].华北电力技术,2017(1):1-7.
- [3] 李兴源,曾琦,王渝红,等.柔性直流输电系统控制研究综述[J].高电压技术,2016,42(10):3025-3037.  
Li Xingyuan, Zeng Qi, Wang Yuhong, et al. Control Strategies of Voltage Source Converter Based Direct Current Transmission System [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037(in Chinese).
- [4] 胡益,王晓茹,滕予非,等.多端电压源型直流互联系统频率稳定性控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(10):51-57.  
Hu Yi, Wang Xiaoru, Teng Yufei, et al. Frequency Stability Control Strategy for Voltage Source Converter Based Multi-terminal Direct Current Interconnected System[J]. Automation of Power System, 2017, 41(10): 51-57(in Chinese).
- [5] 吴林林,徐曼,刘辉,等.新能源集群经柔直送出孤岛系统电压优化控制策略[J].全球能源互联网,2018,1(2):112-119.  
Wu Linlin, Xu man, Liu Hui, et al. Optimal Voltage Control Strategy for Islanded Aggregated New Energy System Connecting by VSC-HVDC [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 112-119(in Chinese).
- [6] 徐政.柔性直流输电系统(第2版)[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [7] 贺之渊,涂莉,阳岳希,等.英国Shetland柔性直流输电工程系统设计[J].全球能源互联网,2018,1(sup1):296-302.  
He Zhiyuan, Tu Li, Yang Yuexi, et al. System Design of Shetland VSC-HVDC Transmission Project [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(sup1): 296-302(in Chinese).
- [8] 刘天琪,陶艳,李保宏.风电场经MMC-MTDC系统并网的几个关键问题[J].电网技术,2017(10):3251-3260.  
Liu Tianqi, Tao Yan, Li Baohong. Critical Problems of Wind Farm Integration via MMC-MTDC System [J]. Power System Technology, 2017(10): 3251-3260(in Chinese).
- [9] 宋平岗,罗剑,游小辉,等.基于MMC的多端柔性直流输电系统控制策略研究[J].现代电力,2017,34(1):55-61.  
Song Pinggang, Luo Jian, You Xiaohui, et al. Research on Control Strategy of Multi-terminal HVDC Based on MMC [J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 55-61(in Chinese).
- [10] 刘盼盼.基于MMC的多端直流输电系统仿真研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [11] 韩亮,白小会,陈波,等.张北±500 kV柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J].电力建设,2017,38(3):42-47.  
Han Liang, Bai Xiaohui, Chen Bo, et al. Control and Protection System Design of Zhangbei ±500 kV Converter Station in VSC-HVDC Power Grid [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 42-47(in Chinese).
- [12] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等.风电场柔性直流并网与传统直流外送的源网协调控制策略[J].电网技术,2017,41(5):1390-1397.

- Zeng Xueyang, Liu Tianqi, Wang Shunliang, et al. A Coordinated Source-Grid Control Strategy for Wind Farm Integration With VSC-HVDC and Transmission With LCC-HVDC [J]. Power System Technology, 2017, 41(5):1390-1397(in Chinese).
- [13] 姚良忠, 吴婧, 鲁宗相, 等. 含大规模风电场接入的多端直流系统对交流系统频率调节的作用[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3038-3044.
- Yao Liangzhong, Wu Jing, Lu Zongxiang, et al. Effect of MTDC System Integrating Large Scale Wind Power on AC System Frequency Control [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3038-3044(in Chinese).
- [14] 梁亮, 李普明, 刘嘉宁, 等. 抽水蓄能电站自主调频控制策略研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3288-3295.
- Liang Liang, Li Puming, Liu Jianing, et al. Study on the Control Strategy of Pumped Storage Power Station for Frequency Regulation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3288-3295(in Chinese).
- [15] 张静. VSC-HVDC控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [16] Liu H Z, Chen Z. Contribution of VSC-HVDC to Frequency Regulation of Power Systems With Offshore Wind Generation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3) : 918-926.

收稿日期: 2018-06-29; 修回日期: 2018-08-16。



王炳辉

作者简介:

王炳辉 (1990), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析, E-mail: hbwzztx@163.com。

郝婧 (1987), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统稳定分析, E-mail: xiaoyuhj@126.com。

黄天啸 (1986), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护、柔性直流输电, E-mail: huangtianxiao04@163.com。

(责任编辑 张宇)