

# 输送风电的特高压直流频率调制和无功控制策略研究

孔祥平<sup>1</sup>, 雷霄<sup>2</sup>, 刘琳<sup>2</sup>, 孙栩<sup>2</sup>, 李新年<sup>2</sup>, 周亦夫<sup>2</sup>, 林少伯<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 对于输送大规模风电的特高压直流, 目前实际运行中主要通过调度部门对直流输送功率进行干预和调整, 且一定时间内大范围调整直流功率会引起交流滤波器频繁投切, 大大降低设备使用寿命。本文提出了通过直流系统的频率控制器利用换流站本地信息对直流功率进行自动调制, 并提出了频率控制器关键参数的选取原则和方法; 研究了直流系统无功控制设置为定交流电压的U控模式并提出了电压死区和电压参考值选取方法, 能够在直流针对风电功率波动的调制过程中大大减少交流滤波器投切次数, 同时避免交流电压大范围波动。通过与实际工程极控系统一致的仿真模型进行验证, 仿真结果表明: 所提出的适应性控制策略可行、有效, 能在直流系统跟随风电功率波动自动调制直流功率的同时, 完成对系统频率和电压的控制。

**关键词:** 特高压直流; 风电; 极控系统; 频率控制; 无功功率控制

**DOI:** 10.12067/ATEEE1907067

**文章编号:** 1003-3076(2020)07-0030-07

**中图分类号:** TM743

## 1 引言

我国风能、太阳能等可再生能源具有分布集中度高、与负荷中心呈逆向分布的特点。目前我国绝大多数风电基地所属地区电网规模有限, 必须通过远距离输电, 扩大风电消纳范围, 才能进一步增加开发规模<sup>[1-3]</sup>。

通过特高压直流输电工程将位于“三北”地区大型能源基地的风电以及光伏电力输送到东中部负荷中心是全面落实国家新能源发展规划的主要方式。采用特高压直流输送大规模风电对直流自身设备的可靠运行及控制系统的特性提出了更高要求<sup>[4-6]</sup>。由于风电功率具有波动性和随机性, 目前并不能完全准确地对风电进行预测, 一方面制约风电消纳体量, 另一方面也为调度运行带来一定的难度<sup>[7-8]</sup>。对于送端接入大规模风电的直流系统, 通过调度部门根据风电功率预测情况提前下达功率计划曲线, 同时与火电机组调峰配合, 可以一定程度上提高风电并网规模, 但是对调度部门、火电厂、风电

场协调配合要求较高, 且如果要跟随风电功率不规律的变化, 直流功率也会经常出现较大范围调整, 引起直流系统的交流滤波器较为频繁地投切、换流变压器分接开关频繁自动调整, 降低设备使用寿命的同时, 增加故障概率, 对系统的稳定运行产生一定的隐患, 故需要在这方面提出直流系统相应的优化控制措施。

直流系统能通过调节触发角度来快速改变传输功率, 且无功由固定无功补偿设备基本实现就地平衡<sup>[9-17]</sup>。文献[18, 19]针对大规模风电外送提出了直流相应的协调控制方法, 但需要收集网内风电功率数据, 存在一定实现难度。文献[20]针对孤岛方式考虑了暂态过程的控制, 并未明确频率控制参数的选择以及对直流系统无功补偿设备的影响。本文对两方面的内容进行了探讨, 一是在直流跟踪风电功率波动进行稳态调整方面, 引入直流极控系统已经存在的频率控制器, 能够利用换流站本地换流母线电压测量信息来改变直流输送功率以完成频率控制, 并对其控制策略和相关参数进行调整, 以适应大

**收稿日期:** 2019-07-31

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“特高压直流控制保护系统现场测试及运维优化关键技术研究与应用”(5210EF180013)

**作者简介:** 孔祥平(1988-), 男, 江西籍, 高级工程师, 博士, 研究方向为分布式电源接入的电力系统保护等;  
雷霄(1985-), 男, 土家族, 湖南籍, 高级工程师, 硕士, 研究方向为特高压直流输电技术与大电网仿真分析。

规模风电送出系统的直流有功功率控制;同时,直流大幅度调整功率过程中,为了保证直流系统的可靠运行以及相关一次设备的利用效率和使用年限,对直流系统交流滤波器的无功和电压控制策略以及参数进行适应性地优化,从而完成风电功率波动下特高压直流有功和电压的配合控制。

## 2 风电功率波动对直流和系统的影响

### 2.1 仿真建模

本文基于 EMTDC/PSCAD 电磁暂态软件进行仿真研究。建立了西北某省 2017 年冬小方式的交流系统等值电网仿真模型,总共约包括保留节点 15 个,保留机组 2 个,等值机组 13 个,保留线路 22 条。针对目前我国电网风电现状及发展趋势,仿真建模中采用的风电机组为双馈感应同步发电机组;根据该省实际数据,仿真模型中整流站近区风电最大上网功率 5 000 MW,风电场的无功功率进行就地补偿。

西北地区目前投运或在建的特高压直流有天山—中州直流、灵州—绍兴直流、上海庙—临沂直流、酒泉—湖南直流、昌吉—古泉±1 100 kV 特高压直流,每回输送功率在 8 000~12 000 MW。本文仿真建模场景为送端风火打捆通过一回双极额定功率 10 GW 的特高压直流送出,送端换流站接入系统的短路电流 31 kA。直流控制系统采用与±800 kV 特高压直流工程实际控制保护系统控制逻辑和参数完全一致的详细电磁暂态仿真模型,能真实反映实际直流系统极控制级的响应特性。直流仿真模型经过大量测试并与现场实际录波进行对比,以保证仿真计算结果的准确性。整流站配置两组静止无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC),每组最高 120 MVar 容性无功输出。

直流工程中,交流滤波器和并联电容器的投退分为自动控制和手动控制,自动模式下会根据逻辑和参数实现自动投退,又分为定无功功率控制模式(以下简称 Q 控模式)和定交流电压控制模式(以下简称 U 控模式);手动控制模式下,滤波器和电容器完全靠运行人员下达的指令进行投退。

风电功率的特性主要有以下几点:①风速的波动性和间歇性;②风电的随机性;③风速的不确定性;④风电转换中的不确定性;⑤风电系统外部的不确定性。风电不确定性对系统的影响主要表现在对系统频率和电压稳定性的影响,除此以外,对系统的

暂态稳定性、动态特性、电能质量、电力市场等方面也存在较大影响。本文中风电功率波动特性参考了西北某个风电汇集站实际有功功率和无功功率的日变化曲线,该日曲线为一段观察日内的峰峰值最大变化曲线。

### 2.2 风电功率波动对直流的影响

大规模风电场有功功率波动将对近区特高压直流产生一定的影响。本文首先研究在风电功率波动过程中直流系统运行在常规的定功率控制模式,且火电机组只一定程度参与调峰的情况。由于火电机组只进行部分调峰,而直流为定功率控制模式,故风电功率大幅度波动下系统呈现有功功率不平衡,导致系统频率将随之波动;直流定功率控制下,在稳态变化过程中有功功率不变,换流器消耗的无功功率也基本不变,交流滤波器投切次数很少;换流母线电压的变化导致直流电压变化,引起整流站触发角的变化,换流变压器分接开关会进行自动调整,将触发角限制在 $(15\pm 2.5)^\circ$ 范围内。

根据风电汇集站实际曲线,并考虑实际电网风电出力情况,仿真计算中模拟风电功率波动,波动范围在 1 500~5 000 MW 之间。风电波动对直流系统运行影响的仿真结果如图 1 所示。

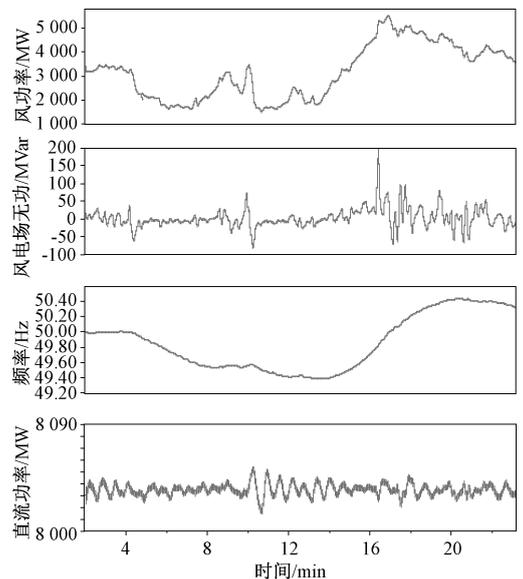


图 1 直流定功率控制下风电功率波动对系统频率的影响

Fig.1 Influence on system frequency by wind power fluctuation under UHVDC power control

以上仿真计算中直流系统无功控制模式设定为目前国内工程最常用的 Q 控模式,定值为 0 MVar,死区为 215 MVar,交流滤波器只投入和切除各一

次。所以无功整体变化不大,交流滤波器只动作了两次。故整流站分接开关动作了 7 次,逆变站分接开关动作 1 次。

### 3 频率控制策略及对直流设备的影响

在火电机组参与部分调峰的情况下,由于直流为定功率控制,且直流对频率变化并不敏感,风电功率波动会引起送端系统频率的变化。本节考虑利用直流控制系统中的频率控制功能,使直流根据换流母线电压中计算得出的系统频率,实时调整输送功率值,来改善系统的频率稳定性。

#### 3.1 频率控制器的设计

频率控制器参考具备火电基地孤岛送出的伊穆直流控制系统,但是针对仿真中直流接入的系统强度和特高压直流容量,部分参数需要进行调整。频率控制器的逻辑如图 2 所示。

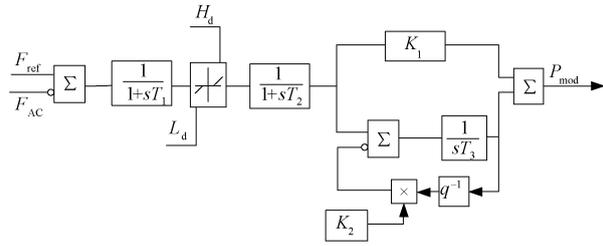


图 2 直流系统频率控制器

Fig.2 Frequency controller of UHVDC system

图 2 中,  $F_{ref}$  为频率参考值;  $F_{AC}$  为接入系统的实际频率,根据换流站本地测量的换流母线电压计算得出;  $T_1$  和  $T_2$  为惯性环节时间常数;  $T_3$  为积分时间常数;  $K_1$  为比例系数;  $K_2$  为反馈环节的比例系数;  $P_{mod}$  为频率控制器输出的直流功率附加值;  $H_d$  和  $L_d$  分别为死区上限和下限值,根据系统运行控制要求,分别取 0.1 Hz 和 -0.1 Hz;  $T_3=0.01$  s;  $K_2=0.0002$ 。比例系数  $K_1$  应根据直流入系统强度(用直流送端接入系统的短路比  $K_{SCR}$  表征)、直流输送容量以及最大风电功率波动等因素相关。 $K_1$  的物理意义为 1 Hz 系统频率变化对应输出的稳态直流功率,应与直流额定功率对风电功率波动最大峰谷差值的比值成正比,且与接入系统的短路比成正比,短路比越大,说明系统越强,调整频率所需要用到的直流功率杠杆越大。综上分析,本文给出  $K_1$  计算公式为:

$$K_1 = \frac{P_{UHVDC}}{P_{CW}} \times K_{SCR} \times 1000 \quad (1)$$

式中,本仿真算例中直流送端接入系统的短路比

$K_{SCR}$  为 5.2,计算得到  $K_1=8300$ ;  $P_{CW}$  为风电场总有功功率;  $P_{UHVDC}$  为直流功率。

#### 3.2 直流功率跟随风电功率波动对直流设备的影响

仿真条件同 2.2 节,投入直流频率控制器后,在设定参数的作用下,直流输送功率随着系统频率的变化自动调制,系统频率低于死区下限时直流输送功率下降,系统频率高于死区上限时直流输送功率上升。仿真计算结果如图 3 所示。

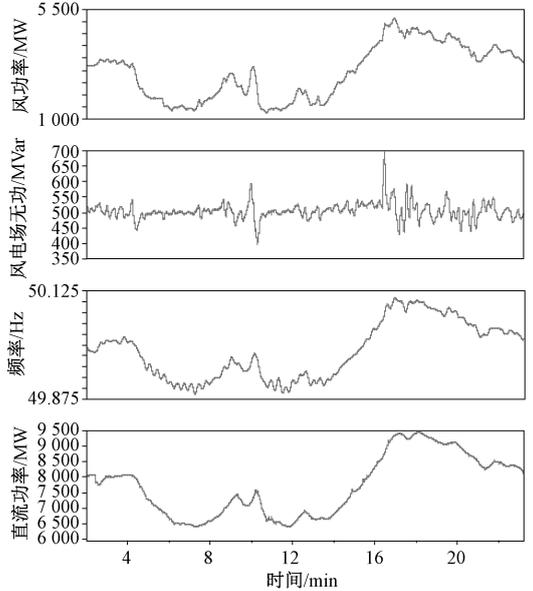


图 3 投入频率控制后风电功率波动下的系统响应

Fig.3 Response to wind power fluctuation under frequency control

投入直流系统频率控制器后,直流系统能根据风电功率波动下换流母线电压频率的变化完全跟踪系统内的有功波动,完成直流功率的跟踪调制,风电功率波动下的系统频率稳定性也明显得到了改善,有无频率控制器的系统频率变化对比如图 4 所示。

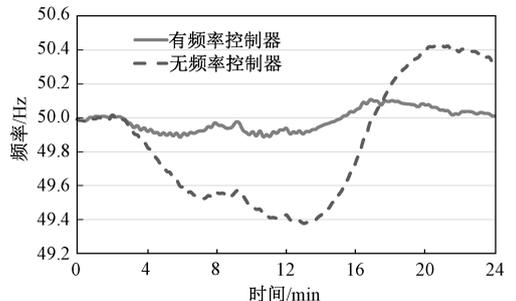


图 4 有无频率控制器的系统频率变化对比

Fig.4 Comparison of system frequency variation with and without frequency controller

由图4的对比可见,直流系统执行频率控制后,能够大大抑制风电功率波动引起的系统频率的波动,系统频率波动幅度减小至原来的16.7%,在频率控制的死区范围49.9~50.1 Hz之间波动。

直流系统进行频率调制,虽然能够改善系统的频率稳定性,但是对于风电功率大幅波动的情况,直流输送功率调制幅度会同样较大,直流与系统交换的无功功率变化也较大,无功功率控制模式Q控下交流滤波器的投切次数会明显增加,交流滤波器小组在扰动过程中投切共19次。整流站分接开关升降动作共14次,逆变站分接开关升降动作共5次。

根据以上研究结果,随着风电功率的波动,若直流输送功率也实时调整,滤波器投切次数将大大增加,从而导致相关设备检修周期缩短,并影响其使用寿命,且频繁动作会为设备带来更高的故障率。在实际运行中,如果需要直流根据风电功率波动来调整输送功率,应通过一定的控制策略,在完成直流控制目的的同时,尽量减少交流滤波器投切次数。

## 4 适应性的无功控制策略

### 4.1 无功手动控制模式

在直流跟随风电功率波动进行频率调制过程中,如果采用无功功率控制的Q控模式,则交流滤波器投切次数会比较频繁,影响设备的使用寿命。下面分析在直流进行频率控制过程中,如果无功控制和换流变压器分接开关控制均为手动模式,对系统频率和电压的控制效果。

仿真条件与前述仿真一致,无功控制和分接开关控制均设置为手动,换流站SVC退出,风电功率波动下直流投入频率控制器,对系统频率的改善作用与无功和分接开关均自动控制情况的对比如图5所示。

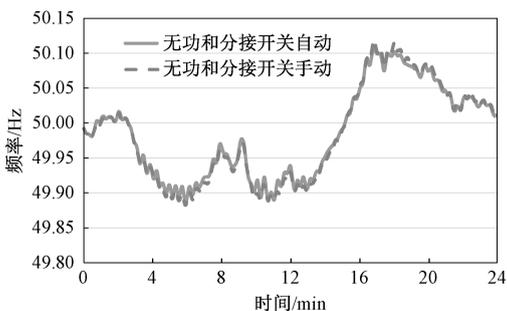


图5 无功和分接开关是否自动控制对系统频率的影响

Fig.5 Comparison on system frequency with automatic and manual control of reactive power and tap changers

由图5可见,无功和分接开关自动控制,系统频率的波动会略小,但差别并不大。可见,直流系统与交流系统交换的无功功率是否平衡,对系统频率控制的影响并不大,原因在于稳态的直流功率控制对交流电压的依赖性较小。无功手动控制后,直流与系统交换的无功变化范围较大,送出无功最高接近800 MVar,吸收无功最高900 MVar左右;交流电压变化范围也较大,在755~780 kV之间波动。

根据以上分析和仿真研究,直流无功补偿与否,对系统频率控制影响并不大,但无功和分接开关手动控制模式下,交流电压变化范围较大,为了保证系统电压波动能够控制在一定范围内,可以考虑将无功控制设定为U控模式。

### 4.2 无功U控模式

对于一定的系统接线方式、电压控制方式和潮流水平,在换流站交流母线上投入 $\Delta Q$ 无功,将引起交流母线电压稳态变化 $\Delta U$ ,用微分方式表示系统稳态电压对无功的灵敏性为 $dU/dQ$ ,假定在已知的运行范围内, $dU/dQ$ 的最大值为 $C$ ,以换流站无功补偿设备设计电压为基值的标幺值最高电压为 $U_{\max}$ ,换流站最大无功分组为 $Q_{\max}$ ,则 $\Delta U$ 应满足:

$$\Delta U \geq CU_{\max}^2 Q_{\max} / 2 \quad (2)$$

为了确保不发生振荡性投切, $\Delta U$ 还需考虑一定的裕度。该公式的实际意义在于,考虑到接入系统条件下对换流站交流滤波器或者固定电容器最大无功设计值 $Q_{\max}$ 进行限制,同时 $\Delta U$ 还要考虑一定的裕度。

$dU/dQ$ 的值随系统接线方式和运行方式的变化有很大变化,按最不利情况确定的 $\Delta U$ 在系统情况有利时显得太大,将造成电压控制精度不够,大量不平衡无功在系统内流动。

U控模式用来控制稳态运行时换流母线交流电压,为保证U控模式的可靠控制并留有一定裕度,换流母线交流电压控制死区取最大无功分组投切引起的电压波动100%。但是在直流跟随风电功率波动的控制方式下,U控死区可以适当增加一定比例。根据系统安全稳定计算结果,特高压直流存在正常运行的交流电压控制要求。本仿真模型中,送端一组交流滤波器投切引起的交流电压波动最大为5 kV。故利用直流进行频率控制过程中,无功U控模式的电压死区可设定的最低值应不低於一组交流滤波器投切引起的交流电压波动,而可设定的最高值应低於交流电压控制要求幅度的1/2。对于本文

中特高压直流实际的电压运行控制范围,换流阀解锁前且换流器处于充电状态时,换流母线电压控制值为 760~780 kV;正常运行时,换流母线电压控制值为 760~792 kV。故本仿真中选择 U 控电压死区范围在 5~16 kV,兼顾交流滤波器寿命以及系统电压控制需求,选择 U 控交流电压定值为 770 kV,死区设定为 $\pm 8$  kV。

进行直流无功控制设定为 U 控模式的仿真研究,分接开关自动控制,换流站 SVC 投入,仿真条件同 2.2 节,风电功率波动下直流进行频率调制。根据仿真结果,无功控制切换为 U 控模式后,交流滤波器投切次数共计 7 次,较无功控制 Q 控模式下次数减少了 63%。整流站分接头升降动作共计 8 次,比 Q 控模式下减少了 6 次,逆变站分接头升降动作共计 4 次,比 Q 控模式下减少了 1 次。

图 6 为无功 Q 控、U 控和手动控制模式下,整流站交流线电压有效值的波形对比。由图 6 可见,无功控制设置为 U 控模式,对交流电压的控制能力最优,其波动范围被严格限制在了 $(770\pm 8)$  kV 之内。

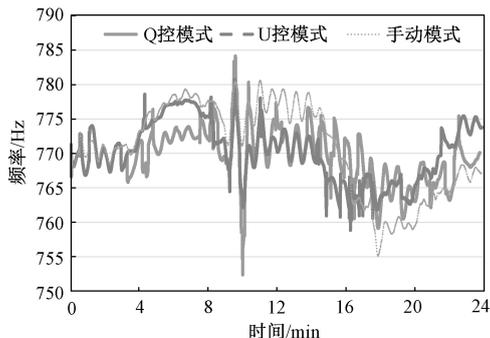


图 6 三种无功控制方式下交流电压变化的对比

Fig.6 Comparison on AC voltage with three reactive power control methods

对于不同的特高压直流工程,根据接入系统的条件,在设计阶段会配置不同的 U 控交流电压死区值。如灵绍直流为 $\pm 8$  kV,天中直流为 $\pm 6$  kV(送端接入 500 kV 交流系统),酒湖直流为 $\pm 5$  kV。不同的 U 控死区,使得直流在功率变化过程中对交流电压的控制能力存在差异,且滤波器的投切次数也会受到影响。若 U 控死区为最低可设定值 $\pm 5$  kV,相同故障和工况下的仿真结果中换流母线交流电压在死区较小时波动范围也理所当然最小,但是交流滤波器的投切次数也更为频繁,交流滤波器投切次数共计 12 次,整流站分接开关动作 8 次,如图 7 所示。

由于 U 控模式下并不对交换无功进行控制,故

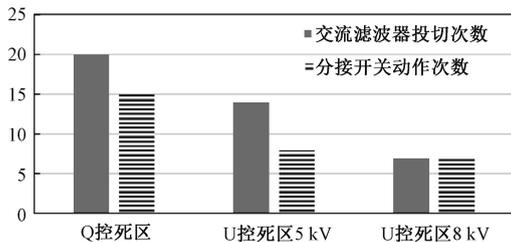


图 7 交流滤波器和分接开关动作次数对比

Fig.7 Comparison on switching times of AC filter and tap changer

无功功率波动较大。但根据 3.1 节的研究结论,换流站无功波动并不影响对频率控制的效果。

增大 Q 控的无功控制死区值,也能减小交流滤波器投切,但是并不能对交流电压进行直接控制,不满足本文期望的对频率和交流电压同时控制的需求,故不再进行更多分析。

需要注意的是,本文针对输送大规模风电情况下的直流配合控制进行了探讨,由于直流功率变化会同时作用于两端交流系统,如果特高压直流存在接入较弱受端交流系统,当直流在频率控制过程中出现有功功率较大幅度地调整,会对馈入的弱受端系统产生影响,故频率控制应综合考虑两端系统的需求,以及相应的调节幅度。相应控制方法会在后续研究中进行探讨,本文由于篇幅原因不再详述。

## 5 结论

本文针对随机波动的风电功率与直流系统协调配合问题,提出了利用直流控制系统的频率控制器来进行直流功率自动调制,并提出了频率控制器比例系数、死区值的选取原则和方法;在直流对风电功率波动进行调峰过程中,直流系统无功控制可设置为定交流电压的 U 控模式,并提出了电压死区和电压参考值选取方法,在直流功率调制的过程将交流电压控制在合理范围之内,并大大减少交流滤波器投切次数和换流变压器分接开关动作次数。通过与实际特高压直流极控系统一致的仿真模型进行研究,验证了本文提出的适应性控制策略的可行性和有效性,利用换流站本地测量信息即能在直流系统跟随风电功率波动调制直流功率的同时,完成对系统频率和电压的控制。

## 参考文献 (References):

[1] 刘振亚,张启平,董存,等(Liu Zhenya, Zhang Qip-

- ing, Dong Cun, et al.). 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究 (Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (16): 2513-2521.
- [2] 张新燕, 孟瑞龙, 梅生伟, 等 (Zhang Xinyan, Meng Ruilong, Mei Shengwei, et al.). 含大规模风电送端系统对直流系统的影响 (Impact on HVDC systems by the sending AC system with large-scale wind farms) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (3): 730-738.
- [3] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等 (Xue Yusheng, Lei Xing, Xue Feng, et al.). 关于风电不确定性对电力系统影响的评述 (A review on impacts of wind power uncertainties on power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (29): 5029-5040.
- [4] 郭小江, 马世英, 申洪, 等 (Guo Xiaojiang, Ma Shiyong, Shen Hong, et al.). 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略 (HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (15): 107-115.
- [5] 王庆, 沙江波, 杨鹏程, 等 (Wang Qing, Sha Jiangbo, Yang Pengcheng, et al.). 同步调相机对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响研究 (Study of impact of SC on ability to defend commutation failure of LCC-HVDC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 29-36.
- [6] 陶玉波, 陈昊, 秦晓辉, 等 (Tao Yubo, Chen Hao, Qin Xiaohui, et al.). 短期风电功率预测概念和模型与方法 (A review of the short-term wind power forecasting theory, model and approach) [J]. 电力工程技术 (Electric Power Engineering Technology), 2018, 37 (5): 7-13.
- [7] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等 (Zhu Xingyang, Zhang Jianhua, Liu Wenxia, et al.). 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用 (Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 88-98.
- [8] 李驰, 刘纯, 黄越辉, 等 (Li Chi, Liu Chun, Huang Yuehui, et al.). 基于波动特性的风电出力时间序列建模方法研究 (Study on the modeling method of wind power time series based on fluctuation characteristics) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (1): 208-214.
- [9] 赵晚君 (Zhao Wanjun). 高压直流输电工程技术 (HVDC transmission engineering technology) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2004.
- [10] 李兴源 (Li Xingyuan). 高压直流输电系统的运行与控制 (HVDC system operation and control) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1998.
- [11] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制 (Power System Stability and Control) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2002.
- [12] 曾南超 (Zeng Nanchao). 高压直流输电在我国电网发展中的作用 (Role of HVDC transmission in the power system development in China) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2004, 30 (11): 11-12.
- [13] 文俊, 李佳琪, 王玲, 等 (Wen Jun, Li Jiaqi, Wang Ling, et al.). MIDC 输电系统后续换相失败的抑制措施研究 (Study on suppression measures of subsequent commutation failure in MIDC transmission systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (4): 79-88.
- [14] 雷霄, 许自强, 王华伟, 等 (Lei Xiao, Xu Ziqiang, Wang Huawei, et al.).  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程实际控制保护系统仿真建模方法与应用 (Simulation modeling method and application of  $\pm 800$  kV UHVDC control and protection system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (5): 1359-1364.
- [15] 艾红杰, 方扬, 陈大鹏, 等 (Ai Hongjie, Fang Yang, Chen Dapeng, et al.). 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究 (Study on stability system and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2018, 46 (24): 118-125.
- [16] 张陵, 刘河林, 文俊, 等 (Zhang Ling, Liu Helin, Wen Jun, et al.). LCC-MTDC 系统换流器直流改进三脉动谐波模型研究 (Advanced three-pulse harmonic models of converters of LCC-MTDC systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (10): 1-6.
- [17] 滕予非, 张鹏, 井实, 等 (Teng Yufei, Zhang Peng, Jing Shi, et al.). 考虑 RAML 环节的特高压直流整流侧动态响应特性及其对送端交流电网稳定性影响 (Dynamic response characteristic of rectifier side of UHVDC considering RAML link and its influence on the power angle stability of sending side power grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2018, 46 (3): 75-82.

- [18] 朱艺颖, 董鹏, 谢国平, 等 (Zhu Yiyang, Dong Peng, Xie Guoping, et al.). 适应大规模风电外送的特高压直流协调控制实时仿真研究 (Real-time simulation of UHVDC cooperative control suitable to large-scale wind farms) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37 (7): 1814-1819.
- [19] 李猛, 张新燕, 常喜强 (Li Meng, Zhang Xinyan, Chang Xiqiang). 功率调制在风火打捆孤岛直流外送中的应用研究 (Research on power modulation applied in wind-thermal-bundled islanded DC transmission system) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2016, 53 (5): 109-112.
- [20] 张爱玲, 李少华, 张崇见, 等 (Zhang Ailing, Li Shaohua, Zhang Chongjian, et al.). “风火打捆” 孤岛特高压直流送端电压和频率控制 (Voltage and frequency control of wind-thermal-bundled island transmission by UHVDC system) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2015, 27 (3): 29-35.

## Adaptive frequency and reactive power control strategy of UHVDC system for large-scaled wind power transmission

KONG Xiang-ping<sup>1</sup>, LEI Xiao<sup>2</sup>, LIU Lin<sup>2</sup>, SUN Xu<sup>2</sup>, LI Xin-nian<sup>2</sup>,  
ZHOU Yi-fu<sup>2</sup>, LIN Shao-bo<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. China Electrical Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** For UHVDC project that transmitting large-scale wind power, the DC power is adjusted by the dispatching department in actual operation. Large-scale adjustment of DC power in a certain period will cause AC filters switching frequently, and the service life of the equipment will be greatly reduced. In this work, the DC power will be automatically modulated by the frequency controller of DC control system based on local information, and the selection principle and method of key parameters of frequency controller are proposed. The U-control mode of reactive power control is recommended and the selection method of voltage dead zone and voltage reference value is proposed. Under the control strategy above, the switching frequency of AC filters could be greatly reduced during peak shaving of wind power fluctuation, while AC voltage remaining stable. The simulation results show that the proposed adaptive control strategy is feasible and effective. It can adjust DC power with the fluctuation of wind power, and control the frequency and voltage stability of the system at the same time.

**Key words:** UHVDC; wind power; pole control system; frequency control; reactive power control