

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.003

# 风光火打捆多直流弱送端电网安全稳定防御系统研究

韩悌<sup>1</sup>, 李碧君<sup>2,3</sup>, 张振宇<sup>1</sup>, 牛拴保<sup>1</sup>, 柯贤波<sup>1</sup>, 霍超<sup>1</sup>

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 南瑞集团有限公司智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

**摘要:**风光火打捆多直流弱送端电网新能源占比高、直流外送规模大、系统转动惯量水平低,交流网架承载能力弱,功角、频率、电压稳定问题突出。文中在总结西北电网风光火打捆后新的特性基础上,分析了当前电网安全运行面临的问题,指出现有感知、控制手段的不足。重点研究了风光火打捆多直流外送电网安全稳定防御系统的构建方案,阐述了防御系统的主要功能,即同步稳定控制、频率控制、全过程电压控制等,介绍了多资源广域协调控制和新能源全景监控等关键技术。评估效果表明,防御系统建成后可有效应对特高压直流的故障冲击,有效阻断连锁反应,提升西北电网的安全稳定运行水平,指导风光火打捆多直流弱送端电网的控制技术发展和工程实践。

**关键词:**风光火打捆;西北电网;直流群;弱送端;安全稳定;防御系统

**中图分类号:** TM72

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)03-0015-08

## 0 引言

风光火打捆经特高压直流群跨区外送,是实现大规模清洁能源集约高效开发和利用的有效手段,对优化调整我国电源结构、加快治理大气污染、实现节能减排目标具有重要意义<sup>[1-5]</sup>。

近年来,围绕风光火打捆多直流外送电网的运行和控制难题,诸多专家和学者从功角<sup>[6-8]</sup>、频率<sup>[9-10]</sup>、电压稳定机理<sup>[11-15]</sup>和控制系统、控制技术<sup>[16-18]</sup>等方面开展了广泛而深入的研究,取得了诸多研究成果,多项实用技术已在电网中得到广泛的应用。

随着特高压直流的快速建设和风电、光伏基地等新能源并网容量持续增长,西北电网呈现出典型的风光火打捆多直流外送型特点,对电网运行提出了新的要求。特别是大容量直流输电与新能源快速发展,改变了西北电网原有电力流分布,交流网架功能定位发生根本性转变。西北交流网架需接力汇集全网清洁能源,通过多回特高压直流外送至全国。然而,当前西北电网的安全防御体系特别是工程实践,主要还是针对传统交流电网(或者含小规模、小容量直流输电)设计,现有防御技术和措施出现了不适应性。因此研究风光火打捆多直流弱送端电网综合防御系统(即西北电网系统保护),是电网新特性下的重要课题。

收稿日期:2019-10-30;修回日期:2019-11-11

基金项目:国家电网有限公司科技项目“多直流弱送端电网新能源紧急功率控制技术研究和示范”

大电网系统保护是一个复杂的系统性工程,需要适应多种运行场景,协调全网各种控制资源,整合多类先进技术<sup>[19-20]</sup>。其中,西北系统保护的协调控制系统主要体现在电网安全稳定第二道防线,需要综合系统分析、自动控制、信息通信等多个专业领域,集成难度大。

文中主要结合西北交直流电网运行实践,对西北电网新的运行特性进行深入分析,总结西北电网面临的主要问题,指出当前感知、控制手段的不足,重点研究风光火打捆直流外送电网稳定控制整体实现思路,并介绍多资源广域协调控制和新能源全景监控等关键技术,旨在为风光火打捆多直流弱送端电网建设与运行提供参考。

## 1 风光火打捆多直流外送电网主要问题

2018年底±1 100 kV 特高压吉泉直流投运,并在2019年大功率运行。西北电网直流总外送规模达到50 000多MW,接近全网最小负荷。西北电网形成两大多落点直流群(西北—新疆联网通道直流群,包括天中、祁韶、吉泉直流;宁夏直流群,包括银东、灵绍、昭沂直流),如图1所示。直流群近区汇集的新能源规模超过全网新能源规模(80 000 MW以上)的80%。弱交流、高占比新能源、多直流大规模跨区输送将成为西北电网的典型特征。

随着西北电网直流及新能源容量持续增长,大容量直流故障扰动给新能源及交流电网带来巨大能量冲击,直流与新能源、直流与交流间形成强耦合关系。西北电网转动惯量水平较低,交流网架承

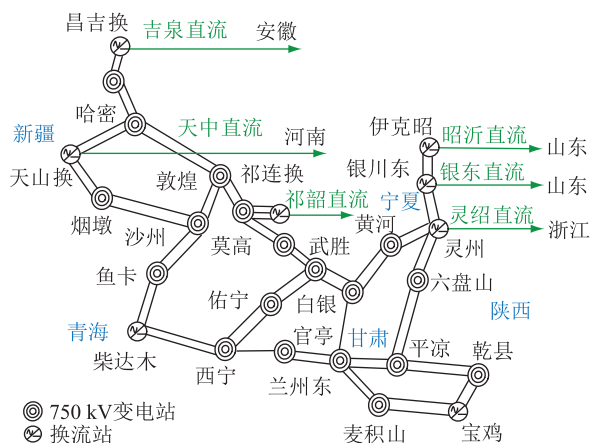


图1 西北电网2018年架构

Fig.1 Structure of northwest China power grid in 2018

载能力不强,电网运行安全域急剧缩小,功角、频率、电压稳定问题突出,连锁故障风险加大。电网运行面临的主要问题由应对交流 $N-1$ 、 $N-2$ 故障向应对大容量直流故障引发的有功、无功冲击转变,加之常规能源被新能源机组大量替代,整个电网呈现高度电力电子化的特征,稳定问题由单一化向复杂化稳定形态发展,运行控制日趋复杂。

### 1.1 交直流严重故障下的同步稳定问题

西北—新疆通过1 700 km的750 kV交流联网通道联系(简称联网通道),网架结构薄弱与送出需求大之间的矛盾造成其运行中无法保持较大的稳定裕度,抵御交直流故障有功冲击的能力弱,特别是随着大直流、大新能源带来的故障冲击加大,同步稳定问题突出。

稳定计算结果表明:联网通道交流 $N-2$ 故障,天中、祁韶直流闭锁或功率突降,吉泉直流满功率运行时发生3次换相失败,同送同受端昭沂与银东直流同时发生换相失败等交直流故障,都可能引发新疆与西北主网暂态功角失稳。图2为吉泉直流满功率(12 000 MW)3次换相失败,盈余功率冲击交流断面,造成的新疆机组与西北主网机组暂态功角失稳。

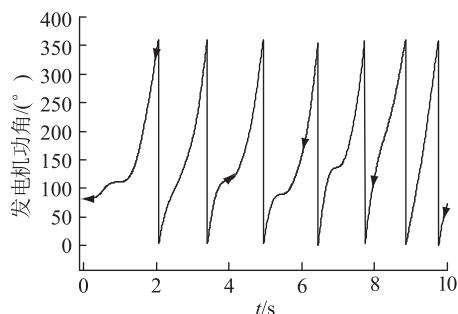


图2 吉泉直流3次换相失败引发联网通道功角失稳

Fig.2 Power angle during HVDC repeated commutation failure

### 1.2 大直流与多新能源交互影响的频率稳定问题

交流故障和直流换相失败过程中,直流及近区风电功率跌落带来瞬时性无功盈余冲击,引发暂态过电压,可能导致大规模风电机组脱网。因线路潮流变轻、无功补偿过剩的因素,进一步拉高周边电压,进而引发风电机组的连锁脱网,存在第三道防线低频减载动作风险。其连锁反应过程如图3所示。

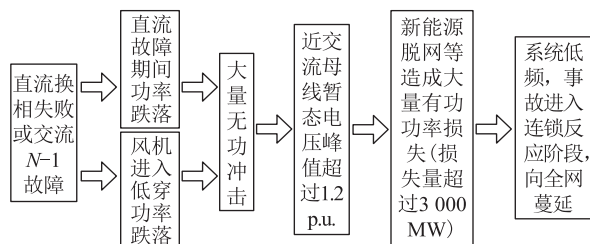


图3 交直流故障引发连锁反应风险

Fig.3 Cascading failure risk triggered by AC/DC fault

图4为祁韶直流满功率(8 000 MW)换相失败后的系统频率。

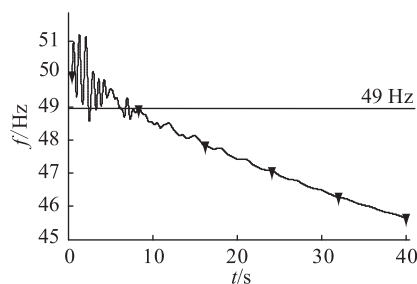


图4 祁韶满功率换相失败连锁反应后的系统频率

Fig.4 Frequency during HVDC repeated commutation failure

直流近区有功及无功功率波动将引起系统频率及电压的大幅变化,近区风电因高频及暂态过电压大规模脱网7 000 MW,进一步导致稳态过电压问题,新能源脱网范围进一步加大,系统频率降低,触发低频减载动作,损失大量负荷。

### 1.3 新能源基地近区电压大幅波动制约直流及新能源送出

新能源无功控制模式不能适应系统电压控制要求。传统的新能源场站无功控制模式造成事故前动态无功补偿预留不到位,事故中调节特性反调效果严重,事故后缺乏统筹协调。新能源暂态过程中脱网风险大,事故后稳态过电压控制难度大。

事故后稳态过电压问题制约直流及新能源输送能力。换流站电压事故后稳态恢复电压运行区间窄,新能源大规模脱网等可能引发稳态过电压,并造成新能源脱网范围进一步加大、设备损坏、直流闭锁等连锁风险。

## 2 稳定控制的整体实现思路

面对上述问题,西北电网现有的感知控制手段难以满足大冲击下的协调控制要求,主要体现在3个方面:

(1) 新能源感知控制手段难以满足大冲击下协调控制要求。新能源已成为西北第二大电源类型,由于新能源的管控与常规电源的管控存在差距,感知手段不足,控制手段少且粗放,难以适应新能源高占比电网的安全稳定运行控制要求。

(2) 现有稳控系统控制架构层次及功能划分不够清晰。已有稳控系统缺乏全局性统筹,主要是基于不同工程建设局部化、碎片化建成。以联网通道稳控系统为例,历经联网一通道、二通道、环天山东环网以及天中、祁韶直流等建设而成,现有的敦煌、沙州主站兼顾甘青新三省及两大直流主要策略,装置及通道耦合紧密,策略高度集中、逻辑复杂,运行维护难度大。

(3) 控制资源不足,控制措施缺乏全局性统筹。西北特高压直流均为风光火打捆直流,火电配比低,为保证切机容量,切机措施向西北全网蔓延,布点选取难度大,同一直流群切机布点高度重合。单一直流闭锁切机后,另一直流可能因切机量不足被迫降低功率。同送同受端直流(天中与祁韶,昭沂与银东,吉泉与灵绍等)同时闭锁情况下,按现有单一直流稳控切机原则,将因切机布点的重合及不平衡量的叠加造成系统切机量不足,引发系统失稳。

针对现有感知控制手段的不足,在原有交流电网三道防线的基础上,文中以阻断连锁反应、提升电网安全稳定运行水平为目标,构建西北电网综合防御体系。其整体构建思路如图5所示。

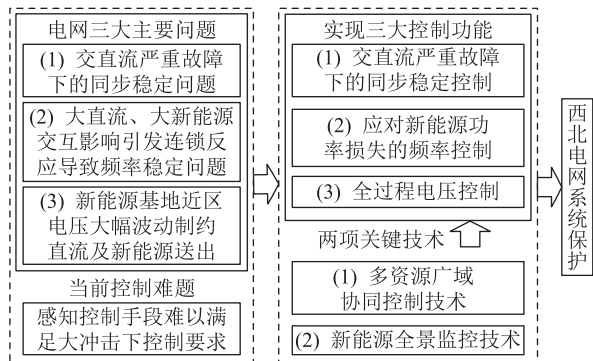


图5 稳定控制整体实现思路

Fig.5 Overall idea for security and stability control

针对电网三大主要问题,以局部问题局部解决、阻断连锁反应为原则,在全面梳理西北电网稳控系统现状基础上,进一步提升感知控制能力,优

化统筹控制资源。攻克两项关键技术点,实现三大控制功能,构建以两大直流群协控系统为基础的系统保护,实现直流群间协调控制。

### 2.1 系统保护总体架构与构建原则

系统保护是西北电网综合防御系统的核心构成部分,其总体架构如图6所示,主要由协控总站、协控主站、直流子站/750 kV 协控子站、330/220 kV 协控子站和风光火执行站的装置构成。

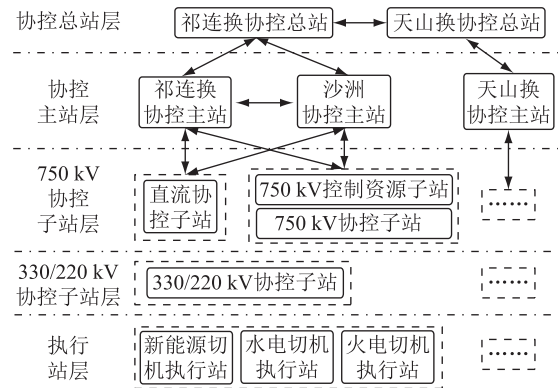


图6 西北电网系统保护架构

Fig.6 System protection structure of northwest China power grid

图6 构建原则主要包括:

(1) 分层分区原则。分区层面,主站作为直流所处交流电网分区的主要决策站,实现策略的有效隔离划分,分区需要发生信息交互时,由总站协调。

(2) 直流群间协调配合原则。群内故障,群内控制,减少群间耦合,尽量减少两大直流群间的功率窜动;群间直流同时故障(如同受端吉泉、灵绍直流同时闭锁),启用直流群间协调控制功能。

(3) 冗余配置原则。地位重要的控制装置采用异地双站、每站双套的配置,采用并列运行模式,防止站内直流失压等导致协控系统失效。可靠性较传统双套配置的稳控系统显著提升。

### 2.2 交直流严重故障下的同步稳定控制

针对交直流严重故障形态,协控系统实时监测联网通道输电功率,通过逐层上传监测全网分散分布的可控资源池信息,协控总/主站根据设定的优先级,实施多资源广域协同控制,降低暂态功角失稳风险,同时计及其他稳定约束,避免控制量大导致潮流大幅转移引发其他次生安全稳定问题。表1为3种典型的设防故障场景。

以祁韶、天中两大直流闭锁或相继闭锁后的同步稳定控制为例,协控系统的决策流程、动作时序如图7所示。若仅祁韶直流故障,通过直流功率紧急支援及配套切机策略实施同步稳定控制;若天中直流再闭锁形成相继故障,则由协控总站综合决策,

表 1 同步稳定设防典型故障

Table 1 Typical failure fortified in synchronous stability control

故障名称	策略协调
	故障后优先实施新能源控制
联网通道 N-2	由远及近切机 多直流功率紧急支援
天中直流闭锁	已有的天中直流配套稳控措施
祁韶直流闭锁	已有的祁韶直流配套稳控措施
天中、祁韶直流同时闭锁	在已有稳控措施基础上,由协控系统优化选择追加控制;控制措施选择避免潮流大幅转移导致其他次生问题

实施切机协调的同步稳定控制。

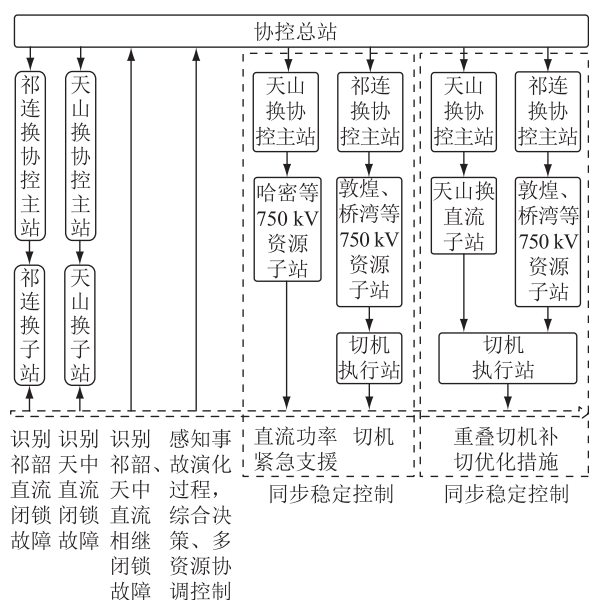


图 7 典型故障场景下协控系统动作

Fig.7 Co-control system action in typical failure scene

### 2.3 应对新能源功率损失量的频率控制

应对新能源大量功率损失引发的系统低频问题的总体思路为:通过预控直流功率及风电出力控制风机脱网范围;以交直流故障作为频率控制启动条件,以新能源功率损失量和系统低频作为判据,并考虑风机低穿影响;采取多直流紧急回降控制措施,有效阻断风机脱网引起的频率连锁反应。具体如下:

(1) 解决直流换相失败新能源出力损失引发的低频问题。综合考虑频率判别条件、紧急回降直流原则及低电压穿越影响 3 个关键环节,认为技术实施的可行性、可靠性满足电网运行要求。设计了图 8 所示的控制逻辑,其中,  $F_{set\_mk}$  为系统频率下跌门槛值;  $T_{set}$  为整定时间定值;  $P_{set\_mk}$  为新能源功率损失量门槛值。新能源功率变化量即功率损失量的计算方法是一项关键技术。

(2) 解决交流线路故障引发新能源功率损失导

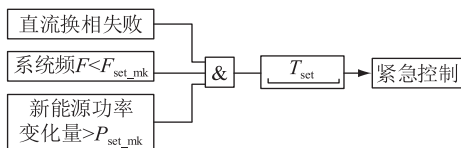


图 8 低频控制逻辑

Fig.8 Low frequency control logic

致低频问题。其思路与解决直流换相失败的思路相同。交流线路故障(损失量超过门槛值)、新能源功率损失量、电网频率三大判据均满足,以新能源功率损失量减去不平衡量确定措施量,采取紧急回降直流控制措施(祁韶、灵绍、银东三大直流均分控制量)。

(3) 应对低频问题的第三道防线优化方案。为应对新能源大规模脱网可能引发的低频问题,考虑优化西北电网低频减载第三道防线,增加系统低频时紧急回降外送特高压直流的功能,然后低频减负荷。

### 2.4 故障全过程电压控制

针对新能源场站故障前、中、后电压控制存在的问题,利用新能源自动电压控制(automatic voltage control,AVC)及协控系统,实现电压的全过程管控,合理调配各种可用资源,解决过电压问题,全过程电压控制逻辑如图 9 所示。

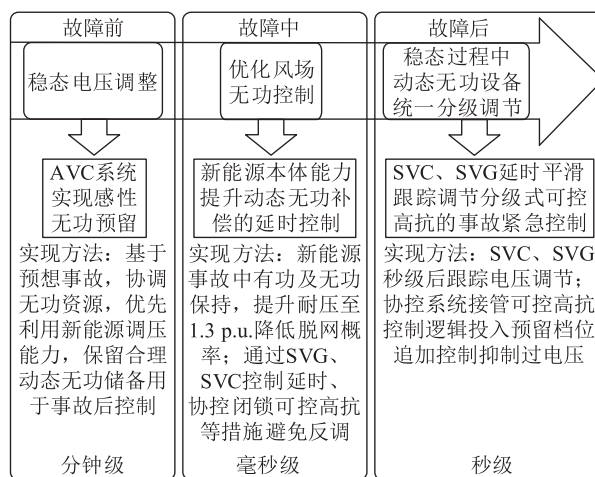


图 9 全过程电压控制逻辑

Fig.9 The whole process voltage control logic

在故障前进行稳态电压调整,AVC 系统实现感性无功预留;在故障中提升新能源本体耐压水平,优化风场无功控制;在故障后静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var generator,SVG)秒级跟踪电压调节,可控高抗事故紧急控制。

西北分中心 AVC 主站根据河西、哈密、海西地区新能源的预测,基于故障相依的动态无功评估方

法,向省调 AVC 主站下发新能源汇集区无功储备需求指令,控制多种无功资源,确保联网通道、新能源汇集区保留合理的动态无功储备,应对直流换相失败、闭锁以及交流故障等情况。如图 10 所示。

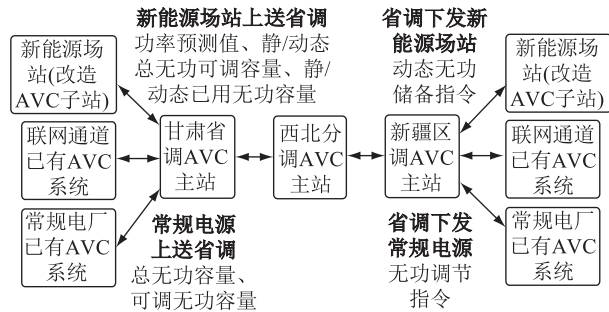


图 10 AVC 预留无功储备实现思路

Fig.10 Implementation of AVC reactive power reserving

### 3 关键控制技术

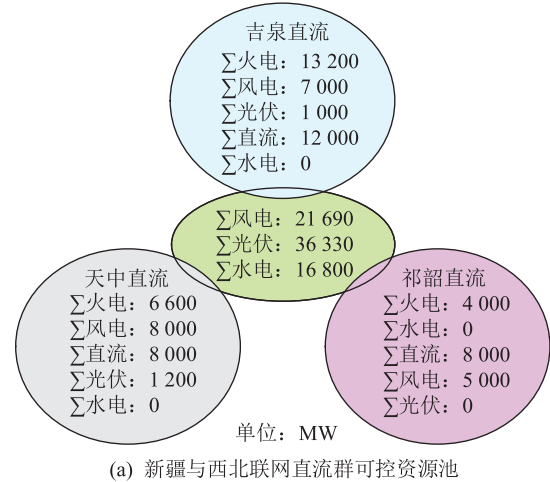
在故障感知、智能决策和措施执行的全过程,有多项关键技术需要重点突破。基础类支撑技术包括多资源广域协同控制技术、新能源全景监控技术等;面向实际工程的适用技术包括精准负荷控制技术<sup>[21-22]</sup>、新能源厂站馈线或单机精益控制技术、自适应重合闸及站域保护技术、在线预决策闭环控制技术。文中紧密结合西北电网的特性和需求,以多资源广域协同控制技术和新能源全景监控技术为例,提出研究框架和技术路线。

#### 3.1 多资源广域协调控制技术

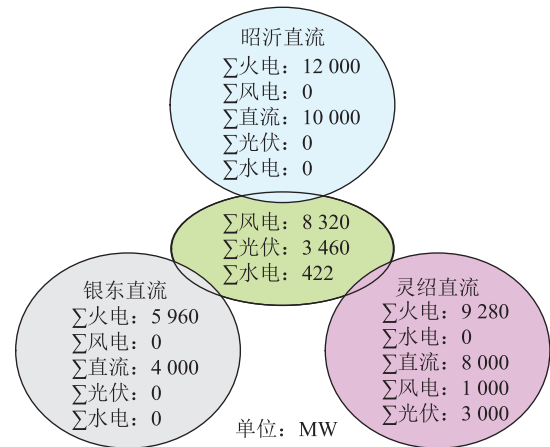
构建西北电网可控资源池,在目标、时间和空间 3 个维度上进行拓展,通过多时间尺度、多空间维度立体协调控制,实现多目标协同,提升西北电网安全稳定裕度。

西北电网的可控资源见图 11。构建两大直流群资源池,实时、全面掌握可控资源运行状态和可控量,汇集可控的火电、风电、直流、光伏、水电、柔性交流输电系统(flexible alternative current transmission systems, FACTS)、负荷等多种类型资源(火电共 51 040 MW,风电共 51 010 MW,直流共 50 000 MW,光伏共 44 990 MW,水电共 17 222 MW,FACTS 约 10 000 MW,负荷约 900 MW),资源池可控总量为 225 162 MW,实现事故前、事故中及事故后频率、电压及同步稳定控制措施的协调配合。

基于故障过程全景状态感知,进行在线故障智能诊断和系统暂态特征综合识别,对系统存在的问题定位和甄别,综合考虑约束条件,结合就地与远方信息,实现控制分区、控制对象及控制量多目标



(a) 新疆与西北联网直流群可控资源池



(b) 宁夏直流群可控资源池

图 11 西北电网可控资源池

Fig.11 Controllable resources of northwest China power grid

实时智能决策。进一步,结合全网可控资源池,进行控制策略协调分解,实现源网荷多类控制资源的紧急、有序、协同、广域控制。

#### 3.2 新能源全景监控技术

西北电网新能源占比日益增大,其出力的随机性、波动性以及电网严重故障下有功、无功的大幅度波动甚至脱网,成为造成新能源成为电网运行的不可控因素。通过提升新能源的感知和控制能力,实现新能源全景监控,提高电网安全运行水平,总体实现思路如图 12 所示。

新能源全景监控是对光伏、风电等新能源发电单元进行事故前实时监视、事故中实时跟踪状态变化、事故后动作行为评估的全过程感知技术,实现新能源故障过程功率损失量实时统计、新能源机组本体逻辑控制、精益切机控制等功能。可统筹控制新疆与西北联网通道 400 余个新能源场站、数万台新能源发电单元,从总站层面分层分区兼顾公平原则切机,避免潮流大范围窜动;在汇集站层面实时监视新能源场站上送功率,在大量切机情况下切除

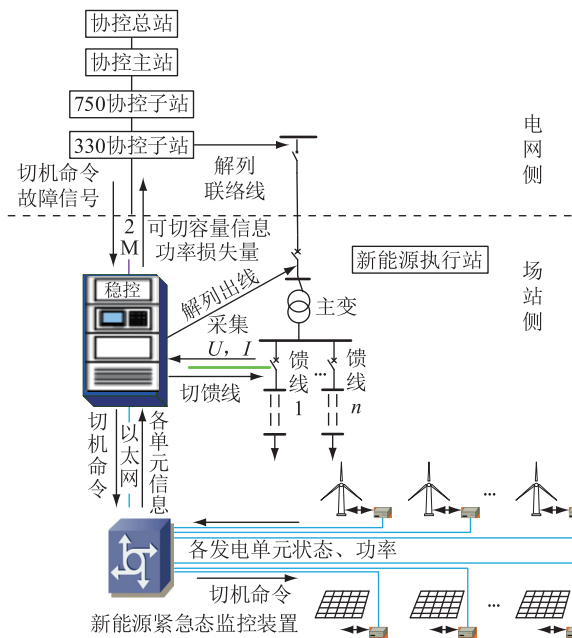


图 12 新能源全景监控框架

Fig.12 New energy panorama monitoring framework

轻潮流上网线,避免切机引发的次生灾害;在新能源场站层面深入 35 kV 或 10 kV 馈线,准确掌握新能源各发电单元实时信息,提高切机措施精确性。

## 4 效果评估及算例

### 4.1 提升复杂电网安全运行掌控能力

构建含源网荷多类型措施的可控资源池,实施全方位监视,可保障全网资源及装置的全景“可观、可控”;通过新疆及甘肃河西可控资源的分散协调控制,阻断交直流、新能源交互作用引发的连锁反应,可实现电力电子化交直流电网的“能控、在控”。

利用直流紧急功率支援可有效缓解电网低频稳定问题。以祁韶、天中直流均满功率(8 000 MW)同时换相失败为算例,新能源脱网 5 000 MW 情况下,可能造成电网低频减载动作损失负荷。利用频率协控,以换相失败信号触发,并统计到脱网容量后,速降祁韶及天中直流 2 000 MW 功率,可使系统频率恢复至 49 Hz 以上,如图 13 所示。该措施可有效提高系统承受风电脱网量的能力,阻断风机脱网引发频率连锁反应。

### 4.2 提升直流外送及新能源消纳能力

通过新能源全景监控及多资源协同控制等关键技术,可有效减少因暂态过电压问题造成的直流输送能力与近区新能源出力的耦合。通过构建电压协控系统,充分发挥电网无功调节能力,抑制过电压新能源脱网,缓解直流输送能力受事故后稳态过电压制约的问题。

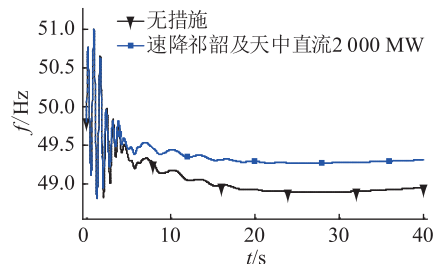


图 13 系统频率

Fig.13 System frequency

以祁韶、天中直流均满功率(8 000 MW)同时换相失败为算例,新能源脱网 5 000 MW 的情况下,事故后祁连换稳态压升高 80 kV。利用预留动态无功补偿容量的手段,事故后释放 SVG、SVC 及调相机动态无功储备,并通过协控系统接管可控高抗设备控制逻辑,追加动态感性无功补偿容量 600 Mvar,可降低祁连换 750 kV 母线电压约 40 kV,阻断新能源脱网引起的电压连锁反应如图 14 所示。

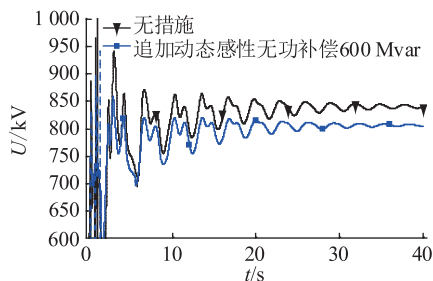


图 14 祁连换 750 kV 母线电压

Fig.14 Voltage of 750 kV bus

按照满足西北—新疆联网交流断面稳定限额,以西北负荷水平不变的方式进行仿真计算,有系统保护的效果如表 2 所示。

表 2 系统保护效果

Table 2 System protection effect

评估指标	现状	有系统保护
目标	电网稳定运行; 直流安全运行; 新能源不脱网	电网稳定运行; 直流安全运行; 新能源脱网可控
直流外送能力/MW	吉泉 6 600; 天中及祁韶 12 000	吉泉 7 600; 天中及祁韶 14 000
新能源送出能力/MW	哈密及酒泉地区新能源 总出力不超过 6 000	哈密及酒泉地区 新能源总出力不超过 10 000

## 5 结语

针对西北风光火打捆、多直流、弱送端的特点,分析西北电网当前及未来一段时间内面临的安全运行风险,总结西北电网的安全稳定问题,指出当前感知控制手段的不足,提出适应风光火打捆直流外送模式的电网稳定控制技术,构建系统保护思

路。效果评估结果表明,采取的应对措施和方法能够有效提升复杂电网安全运行掌控能力和直流外送及新能源消纳能力,指导了风火打捆多直流弱送端电网的控制技术发展和工程实践。

随着 $\pm 1100$  kV 吉泉、未来青海—河南、陕北—武汉等特高压直流工程的投运以及新能源的进一步发展,西北电网将形成直流、新能源、负荷均达亿千瓦级规模的电网。电力电子设备的非惯性、高速、离散、刚性等特征突出,仍需进一步认知风光火打捆多直流弱送端电网稳定特性机理,不断完善、充实和发展特高压交直流电网系统保护的相关理论体系和方法体系,建立完备的系统保护实验验证和安全可靠的通信专网技术支撑体系。

#### 参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平,董存,等. 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[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [2] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):1-10.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [3] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31): 1-6.
- [4] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.  
ZHANG Wenliang, YU Yongqing, LI Guangfan, et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 1-7.
- [5] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京:中国电力出版社,2006:3-7.  
LIU Zhenya. Special high-voltage HVDC transmission technology research achievements[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 3-7.
- [6] 霍超,崔晓丹,牛拴保,等. 一种与直流暂态稳定强相关的交流断面识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(17):83-89.  
HUO Chao, CUI Xiaodan, NIU Shuanbao, et al. A quantitative assessment method for degree of transient stability coupling of DC and AC transmission sections[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 83-89.
- [7] 苗田,郑超,马世英,等. 适应主导薄弱断面迁移的暂态稳定控制[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(19):41-48.  
MIAO Tian, ZHENG Chao, MA Shiyong, et al. Transient stability control adapting to dominant weak section migration[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 41-48.
- [8] 汤奕. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):34-40.  
TANG Yi. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 34-40.
- [9] 张志强,徐友平,袁荣湘,等. 大型互联区域电网解列后送端电网频率特性及高频切机方案[J]. 电网技术,2015,39(1):288-293.  
ZHANG Zhiqiang, XU Youping, YUAN Rongxiang, et al. Frequency characteristics of power grid at sending end of split large-scale interconnected regional power grid and corresponding over-frequency generator-tripping scheme[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 288-293.
- [10] 杨琦,唐晓骏,苏寅生,等. 机组涉网保护与高频切机措施优化配置研究[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):127-131.  
YANG Qi, TANG Xiaojun, SU Yinsheng, et al. An optimal allocation scheme for setting related to power grid and over frequency generator tripping measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 127-131.
- [11] 牛拴保,柯贤波,王吉利,等. 计及分级式可控高抗的750 kV 联网通道自动电压控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(15):149-153.  
NIU Shuanbao, KE Xianbo, WANG Jili, et al. Automatic voltage control for 750 kV grid channel considering stepped controlled shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 149-153.
- [12] 王旭冉,郭庆来,孙宏斌,等. 考虑快速动态无功补偿的二级电压控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):53-60.  
WANG Xuran, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Secondary voltage control considering rapid dynamic reactive power compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 53-60.
- [13] 贺静波,万磊,霍超,等. 高压直流输电非典型工况下过电压异常风险分析[J]. 电网技术,2014,38(12):3459-3463.  
HE Jingbo, WAN Lei, HUO Chao, et al. Abnormal over-voltage risk analysis of HVDC transmission on atypical conditions[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3459-3463.
- [14] 贺静波,庄伟,许涛,等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术,2014,40(6):1839-1844.  
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2014, 40(6): 1839-1844.
- [15] 王伟. 大规模并网风电场的无功电压紧急控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):8-14.  
WANG Wei. Reactive voltage emergency control strategy for large-scale wind farm integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22): 8-14.

- [16] 罗煦之,张健,贺静波,等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J]. 电网技术,2015,39(9):2526-2531.  
LUO Xuzhi,ZHANG Jian,HE Jingbo,et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage[J]. Power System Technology,2015,39(9):2526-2531.
- [17] 梁少华,夏尚学,霍超,等. 青藏直流稳控与极控系统的接口及协调控制方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(8):125-128.  
LIANG Shaohua,XIA Shangxue,HUO Chao,et al. Interface and coordination control method between Qinghai-Tibet DC stability control system and pole control system[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(8):125-128.
- [18] 赵分县,罗剑波,杨明凯,等. 区域安全稳定控制系统在青海西部电网中的应用[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):91-93.  
ZHAO Fenxian,LUO Jianbo,YANG Mingkai,et al. Application of regional security and stability control system to western power grid of Qinghai[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):91-93.
- [19] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):2-10.  
CHEN Guoping,LI Mingjie,XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):2-10.
- [20] 董昱,张鑫,余锐,等. 水电汇集多直流弱送端电网稳定控制及系统保护方案[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):19-25.  
DONG Yu,ZHANG Xin,YU Rui,et al. Stability control and system protection scheme for power grid with hydropower pool and multi-DC weak sending-end[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):19-25.
- [21] 罗建裕,李海峰,江叶峰,等. 基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J]. 电力工程技术,2017,36(1):25-29.  
LUO Jianyu,LI Haifeng,JIANG Yefeng,et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):25-29.
- [22] 任建锋,颜云松,罗剑波,等. 毫秒级精准负荷控制系统设计与工程应用[J]. 电力工程技术,2018,37(1):45-50.  
REN Jianfeng,YAN Yunsong,LUO Jianbo,et al. The design of millisecond-level precise load control system and engineering application[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(1):45-50.

作者简介:



韩梯

韩梯(1963),男,硕士,高级工程师,从事电力系统调度运行控制相关工作(E-mail:hanti@nw.sgcc.com.cn);

李碧君(1966),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制相关工作;

张振宇(1974),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制相关工作。

## Security and stability defense system for power grid with wind-photovoltaic-thermal power bundling and multi-DC weak sending-end

HAN Ti<sup>1</sup>, LI Bijun<sup>2,3</sup>, ZHANG Zhenyu<sup>1</sup>, NIU Shuanbao<sup>1</sup>, KE Xianbo<sup>1</sup>, HUO Chao<sup>1</sup>

(1. Northwest Division of State Grid Corporation of China,Xi'an 710048,China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control,NARI Group Co.,Ltd.,Nanjing 211106,China)

**Abstract:** In the sending system of wind-photovoltaic-thermal-bundling power grid transmitted by multi direct current(DC), the new energy and DC transmission proportion is large, system inertia level is low, carrying capacity of alternative current(AC) grid structure is not strong and stability issues of power angle, frequency and voltage are prominent. Based on summarizing new characteristics of the northwest China power grid after wind-photovoltaic-thermal bundled, problems during security operation of the northwest China power grid are analyzed, and shortcomings of existing perceiving and controlling methods are pointed out. The security and stability defense system construction scheme of wind-photovoltaic-thermal bundling power grid for DC transmission is focused. Besides, main functions of defense system are elaborated in detail, such as synchronous stability controlling, frequency controlling, full process voltage controlling and key technologies of major breakthrough. The evaluation effect shows that the defense system can effectively deal with fault impact of ultra high voltage direct current, block cascading faults, and improve security and stability level of the northwest China power grid operation. The technical scheme guides the development of controlling technology and engineering practice for power grid with wind-photovoltaic-thermal power bundling and multi-DC weak sending-end.

**Keywords:** wind-photovoltaic-thermal power bundling; northwest China power grid; direct current group; weak sending-end; security and stability; defense system

(编辑 吴楠)