

# 大规模风火电送端系统直流闭锁紧急控制策略研究

丁 明<sup>1</sup>, 张 炎<sup>1</sup>, 韩平平<sup>1</sup>, 张海天<sup>1</sup>, 李宾宾<sup>2</sup>

(1. 安徽省新能源利用与节能省级实验室(合肥工业大学), 合肥 230009; 2. 安徽省电力科学研究院, 合肥 230601)

**摘 要:** 在分析直流闭锁对送端系统电压特性影响的基础上, 提出一种风火电和电容器协调的紧急控制和优化切机策略。该策略在保证系统稳定的基础上, 通过优化整流站电容器的切除量和风火电切机量的分配, 使恢复系统稳定所需的风火电总切机量最小。最后以西北某风火打捆直流外送系统为算例, 验证所提协调控制策略的有效性与实用性。

**关键词:** 直流输电; 风电; 电容器; 直流闭锁; 协调控制

**中图分类号:** TM71

**文献标识码:** A

## 0 引 言

中国风电近年来迅速发展, 在风能资源丰富的三北地区和沿海地带规划建设了多个千万 kW 级风电基地<sup>[1-3]</sup>。但三北地区负荷水平较低, 风电就地消纳能力有限, 大规模波动性风电单独外送不利于系统的安全稳定运行, 而采用风电与火电打捆特高压直流外送, 在降低风电外送功率波动的同时也提高了运行经济性, 已成为大规模风电外送的优选方案<sup>[4,5]</sup>。

风火打捆特高压直流外送在带来巨大经济效益的同时, 也改变了系统的暂态稳定特性。特高压直流闭锁后, 整流站电容器通常全部切除, 送端系统产生加速能量, 造成机组功角振荡或失稳。同时盈余的有功功率向交流通道大规模转移, 造成通道电压过低, 影响系统的安全运行<sup>[6]</sup>。此时若通过切除火电与风电机组以保证系统稳定, 代价可能较大。在直流闭锁后的紧急控制策略中, 整流站电容器投切控制最为便捷, 无需附加设备投入, 可以有效调节系统电压水平。若保留部分电容器, 不仅可以提升近区电网电压水平, 还可以提升交流通道输送能力, 减少风火电切机量。因此, 如何协调风电、火电和电容器组切机量, 制定有效的紧急控制和优化切机策略对保证风火打捆系统的安全运行有着重要意义。

目前关于风火打捆特高压外送系统紧急控制策略的研究较少。文献[7]分析了风电和火电机组暂态特性的差异性以及各自对系统暂态稳定的影响, 提出了故障后火电与风电切机量的计算方法。文献[8]分析特高压直流投运对送端电网稳定性的影响, 对比不同配套火电运行方式下直流闭锁时的切机量。文献[9]分析不同风火电切机方案对风火打捆送端系统电压的影响。文献[10]分析风电与火电在保持系统稳定效果上的差异性, 认为从保证功角稳定出发, 应增加火电切除量, 为保证频率与电压的控制能力, 也应切除适量风电机组。文献[11,12]指出紧急控制中应考虑风电与火电的切机比例, 若只切除火电机组会造成风电穿透率过大, 系统阻尼比过低, 不利于系统恢复。文献[13]给出切机机组选择原则, 并提出基于紧急切机优先系数的风火协调切机策略。文献[14]分析不同类型风电机组切机对首摆效果的差异性及对系统阻尼的影响, 并提出协调功角稳定及切机后恢复过程的双目标切机模型。

可见, 针对风火打捆外送系统紧急控制的研究主要集中在直流闭锁或交流故障后切机量的计算和切机量的分配。但风火电与电容器协调控制策略的研究还未见报告。本文在研究特高压直流闭锁对送端系统电压稳定性影响的基础上, 提出一种以风火电总切机量最小为目标, 协调切除风电、火

收稿日期: 2017-06-28

基金项目: 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院)开放基金

通信作者: 张 炎(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事大规模风火电外送系统稳定与控制方面的研究。hfutzhangyan@163.com

电和电容器的紧急控制策略。通过优化电容器切除量,提升交流通道电压水平和外送能力,并合理分配火电与风电的切机量来防止过切,使恢复系统稳定所需切机量最小,可为实际工程中紧急控制提供离线参考。通过某实际风火打捆特高压外送系统算例分析,本文比较了基于火电机组、风电机组优先、风火电协调、风火电与电容器协调4种控制策略对恢复系统稳定的效果,验证了风火电与电容器协调的紧急控制策略的有效性。

## 1 直流闭锁后送端电压特性分析

### 1.1 直流闭锁对送端电压的影响

特高压直流正常运行输送有功功率的同时需要消耗大量的无功功率,其关系为<sup>[15]</sup>:

$$Q_{dc} = P \tan \varphi \quad (1)$$

$$\tan \varphi = \frac{(\pi/180)\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \quad (2)$$

式中,  $Q_{dc}$  ——整流站消耗的无功;  $P$  ——整流站直流侧功率;  $\varphi$  ——整流站功率因数角;  $\mu$  ——换相角;  $\alpha$  ——触发角。

整流站正常运行时消耗的无功功率约为其输送容量的40%。为保证直流系统的正常运行,整流站交流侧装设有大量电容器和滤波器组,对系统进行无功补偿。为方便讨论,本文中把电容器和滤波器组统称为电容器组。

特高压直流闭锁后,送端系统原有的有功和无功平衡被打破。闭锁后直流输送容量降为零,送端系统产生加速能量,机组转子加速,功角发生摆动。同时,整流站不再消耗无功功率,大量盈余无功造成送端电网母线电压骤升。整流站电压上升幅度和系统短路容量、无功剩存量密切相关<sup>[16]</sup>:

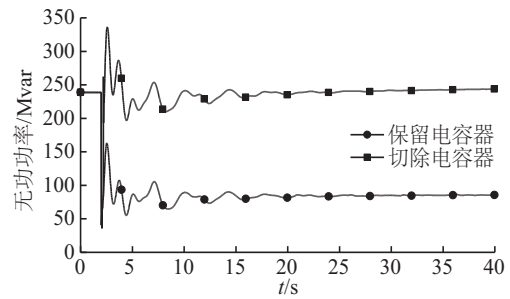
$$\Delta U \cong \Delta Q / S_c \quad (3)$$

式中,  $\Delta U$  ——整流站交流压升;  $\Delta Q$  ——整流站无功功率;  $S_c$  ——整流站短路容量。

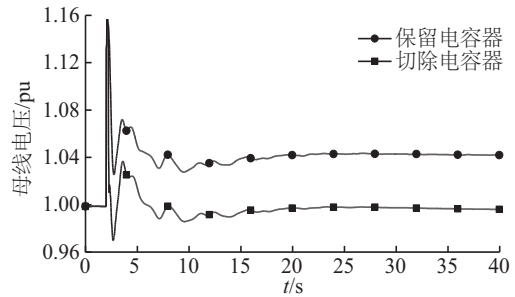
送端电网母线电压上升水平随着与整流站电气距离的增加而降低。直流闭锁后,风火打捆系统配套火电机组和送端主网火电机组励磁系统快速动作,减少机组无功输出,调节系统无功功率。若送端系统功角未发生失稳,机组无功输出随功角摆动后趋于稳定,送端电网母线电压也随之恢复稳定。对于风火打捆联网外送系统,送端系统规模通

常很大,直流闭锁后不会造成系统频率失稳。图1a~图1c为西北电网哈密—郑州±800 kV特高压直流单极闭锁后,特高压直流配套火电机组功角变化情况和系统电压、频率变化情况。

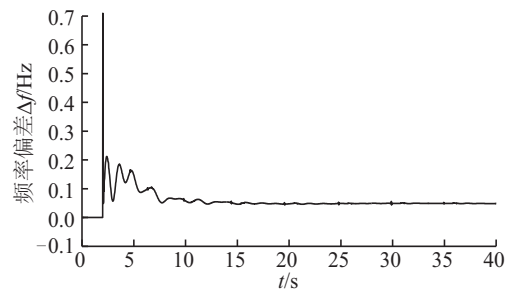
按目前控制方式,特高压直流闭锁后,为平衡送端系统盈余无功功率,整流站全部电容器在直流闭锁后延时200 ms从系统切除<sup>[6]</sup>。与不切电容器时相比,全部切除电容器后送端母线电压骤升幅值相同,持续时间为200 ms,振荡过程中电压跌落程度更加明显,恢复稳定后电压水平较低。图1b为特高压直流单极闭锁后送端电压仿真对比,可以看出切除电容器时整流站交流母线电压比保留电容器时约低0.045 pu。直流闭锁后系统的频率变化情况如图1c所示,可看出直流闭锁后系统频率满足安全约束,未发生越限。



a. 直流闭锁后火电机组无功出力



b. 直流闭锁后整流站交流母线电压



c. 直流闭锁后系统频率变化情况

图1 特高压直流单极闭锁后系统仿真结果

Fig. 1 Simulation of system after HVDC monopolar blocking

## 1.2 潮流转移对送端电压稳定性影响

风火打捆直流闭锁后,送端电网母线电压骤升的同时,有功功率向交流通道转移,造成交流外送通道潮流明显增加。

交流线路无功损耗为:

$$\Delta Q_L = I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \quad (4)$$

式中,  $\Delta Q_L$  ——交流线路无功损耗;  $I$  ——线路电流;  $X$  ——线路电抗;  $P$ 、 $Q$  ——线路有功和无功功率;  $U$  ——母线电压。

通常,电力系统无功功率就地平衡,因此有  $Q \ll P$ ,故式(4)可写为:

$$\Delta Q_L = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \approx \frac{P^2}{U^2} \quad (5)$$

由此可见潮流转移会增加交流线路无功损耗,降低交流外送通道节点电压。若直流闭锁后切除整流站电容器,对于电压支撑能力较低或负荷中心地区,大规模潮流转移会明显降低电压水平,造成交流通道局部低电压,甚至影响系统的安全运行<sup>[17]</sup>。

若闭锁后保留整流站部分电容器,可补偿交流通道的无功损耗,提升送端电网和外送通道电压水平,从而提升交流通道潮流外送的能力,减少系统的切机量,并且能够提高发电机等动态无功电源的功率因数,从而改善系统电压稳定性。图2所示为某实际系统特高压直流闭锁后交流外送通道节点电压仿真图,可看出闭锁后保留部分电容器可明显提升电压水平。

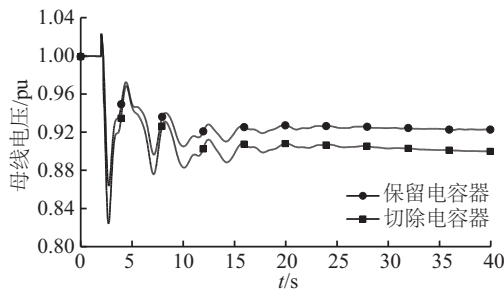


图2 交流外送通道节点电压对比

Fig. 2 Voltage comparison of AC transmission line

特高压直流输送容量巨大,双极闭锁后极易导致送端系统功角失稳。为减少系统加速功率和保证功角稳定,需要对火电和风电进行切机控制。随着火电机组切除数量的增加,系统电压调节能力也

逐渐降低。直流双极闭锁后,电容器保留量也会对系统恢复过程产生影响。电容器保留过少,无法充分补偿潮流转移增加的无功损耗,电压提升效果有限。电容器保留过多,会造成送端系统无功过剩,当电容器保留量超过系统调节能力时,会造成系统电压过高,风电场高压脱网。因此,在风火打捆系统直流闭锁后紧急控制中,需要协调电容器与风电的切除量,以降低恢复系统稳定所需代价。

## 2 风、火电与电容器协调的紧急控制策略

### 2.1 紧急控制策略目标与约束条件

特高压直流双极闭锁后,切除双馈感应风电机组对减小系统加速能量、改善系统首摆稳定性的作用不如切除火电的效果明显,为改善系统功角稳定性应优先切除火电机组<sup>[18,19]</sup>,但火电切机步长较大,且具有调频调压作用,为减少系统火电切机量及提升系统调节能力,也应适量切除部分风电机组<sup>[20]</sup>。直流整流站电容器切除量过多,难以提升交流通道负荷中心电压水平;电容器切除过少,会增加送端电网电压调节难度,难以控制电压水平在正常范围内,造成电压失稳。因此对于风火打捆特高压外送系统直流闭锁后的紧急控制策略,应当优化闭锁后电容器的切除量,提升交流通道的电压水平和外送能力,并且考虑火电机组和风电机组的协调配合,以尽可能少的代价恢复系统运行的稳定性。为此,本文提出一种以火电与风电总切机量最小为目标的紧急控制策略,协调火电、风电、电容器的切除量,为故障后紧急控制提供切机参考。

该策略的目标函数为:

$$\exists \text{opt} \Delta Q, \min \Delta P = \min (\Delta P_G + \Delta P_F) \quad (6)$$

式中,  $\text{opt} \Delta Q$  ——最优电容器切除量;  $\Delta P$  ——紧急控制策略中火电与风电的总切机量;  $\Delta P_G$  ——火电切机量;  $\Delta P_F$  ——风电切机量。

该切机策略的约束条件为:

1) 电容器切除量约束

直流闭锁后电容器以组为单位切除,整流站电容器切除量  $\Delta Q$  满足:

$$0 \leq \Delta Q \leq Q_c \quad (7)$$

式中,  $Q_c$  ——整流站无功补偿配置容量。

2) 暂态稳定约束

闭锁后各发电机间的最大相对功角小于  $180^\circ$ , 且相对功角为减幅振荡, 振荡逐步衰减消失; 联络线功率振荡呈衰减趋势; 系统中枢点电压不低于 80% 额定电压, 且持续时间不超过 1.0 s, 电压为减幅振荡, 振荡逐步衰减消失。

### 3) 静态安全约束

系统稳定后, 应满足电压和线路潮流等静态安全约束:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ |P_b| \leq P_{b\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$  —— 母线电压的上/下限;  $P_b$ 、 $P_{b\max}$  —— 线路潮流及其潮流限值。

## 2.2 风电、火电、电容器协调的紧急控制策略

由于直流双极闭锁后通常导致送端系统电压伴随功角一起失稳, 在采取紧急控制措施系统功角稳定后仍可能出现部分地区电压过低, 不满足静态安全约束的情况。为此本文提出一种风火电和电容器协调的紧急控制和优化切机策略, 流程如图 3 所示。

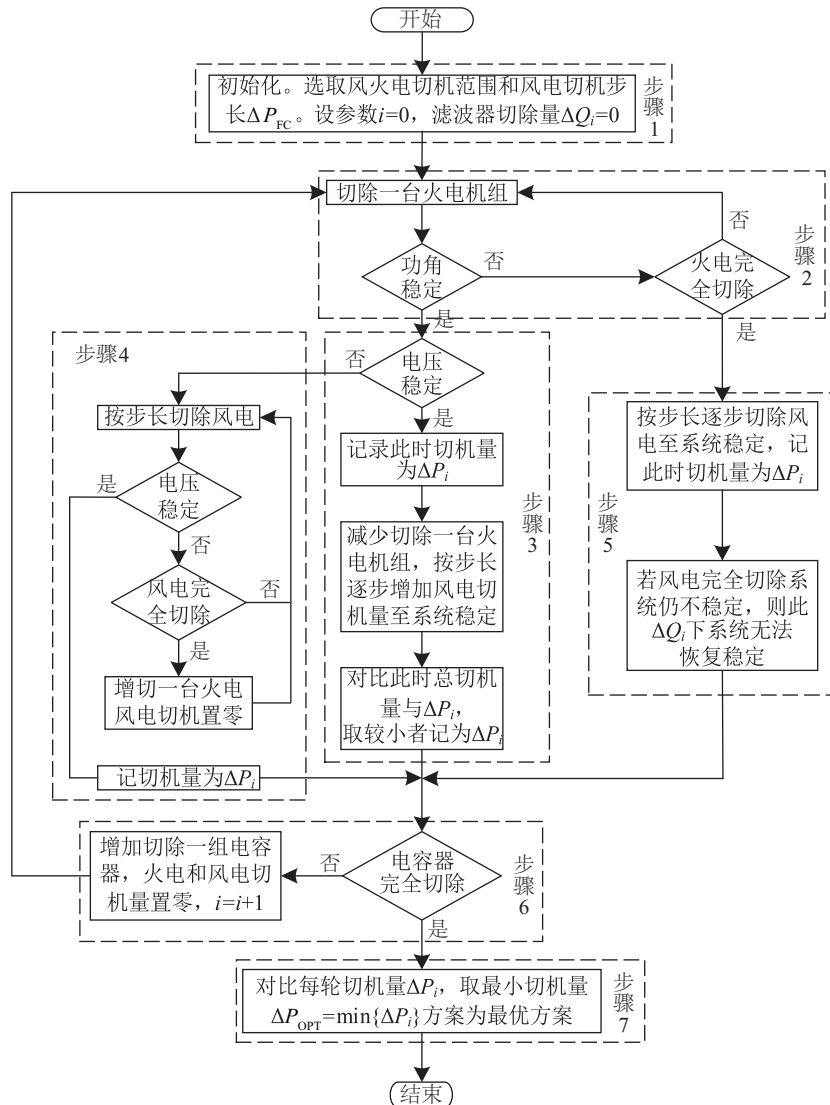


图3 风火电与电容器协调切机策略流程

Fig. 3 Flow chart of coordination tripping strategy of thermal/wind power units and capacitors

对图 3 所示的切机策略流程说明如下:

步骤 1) 初始化, 即选取火电和风电切机范围, 选定风电切机步长  $\Delta P_{FC}$ 。参数  $i$  表示切机轮次, 与

整流站电容器切除组数相对应, 设  $i=0$ , 滤波器切除量  $\Delta Q_i=0$ 。

步骤 2) 逐台切除火电机组, 并判断系统功角是



否稳定,若稳定,则转入步骤 3);若火电待切除机组切除完毕仍不稳定,则转入步骤 5)。

步骤 3)判断系统电压是否稳定,若不稳定,进入步骤 4)。若稳定,记录此时切机量为  $\Delta P_i$ 。由于火电机组切机步长较大,存在过切的可能性,因此减少切除一台火电机组,转入切除风电。按步长逐步增加风电切机量,直至系统稳定,并将此时切机量  $\Delta P$  与  $\Delta P_i$  比较,取较小者记为  $\Delta P_i$ 。转入步骤 6)。

步骤 4)此时系统电压不稳定,说明有功功率切除量不足,需要继续切机。由于火电机组具有调频调压的作用,为提升系统电压调节能力、防止过切,转入切除风电。按步长逐步增加风电切机量,直至系统稳定。若风电完全切除后电压仍不稳定,则将风电切机量置零,增加切除一台火电机组,再按步长  $\Delta P_{FC}$  增加风电切除量至电压稳定。记录系统电压稳定时切机量为  $\Delta P_i$ 。转入步骤 6)。

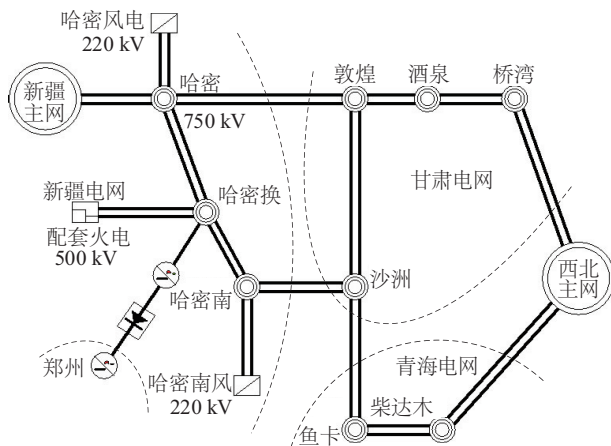
步骤 5)若火电切除完毕系统仍不稳定,则按照步长逐步增加风电切机量至系统稳定,并记录此时切机量为  $\Delta P_i$ 。若风电完全切除后系统仍不稳定,则说明在此电容器切除量  $\Delta Q_i$  下,系统无法恢复稳定。

步骤 6)增加切除一组电容器,参数  $i=i+1$ ,转入步骤 2),进行下一轮次切机计算。记录不同电容器切除量下风电与火电的切除方案,直至电容器完全切除。

步骤 7)对比不同电容器切除量下的火电与风电的总切除量  $\Delta P_i$ ,选取  $\Delta P_{OPT} = \min\{\Delta P_i\}$  为最优切机量,并输出此轮次火电、风电、电容器切除方案为最优紧急控制和优化切机方案。

### 3 算例分析

本文在 PSD-BPA 中构建如图 4 所示的某水平年西北风火打捆特高压直流外送系统模型。特高压直流额定电压  $\pm 800$  kV,额定功率 8000 MW,整流站接入新疆电网。风火打捆配套火电机组全部满发,有功出力为 6600 MW(10 台 660 MW 的机组)。哈密南地区风电出力 2000 MW,哈密地区风电出力 850 MW。新疆电网通过哈密—敦煌双回和沙洲—鱼卡双回 750 kV 交流线路向西北主网输送电能 4600 MW。特高压直流整流站共配置 16 组交流电容器,总无功补偿容量 3880 Mvar<sup>[20]</sup>。



注:图 4 中虚线表示电网的省界,与图中甘肃电网、青海电网、新疆电网、郑州对应

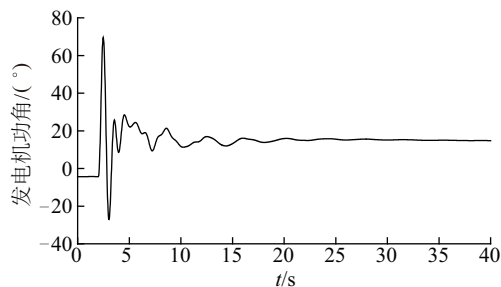
图 4 风火打捆特高压外送系统结构示意图

Fig. 4 Structural sketch of wind-thermal-bundled transmission system

本文中特高压直流在 2 s 时发生双极闭锁。整流站电容器闭锁后延时 0.2 s 切除,风电与火电再延时 0.1 s 动作切除。直流闭锁后,由系统仿真可得配套火电机组功角加速度明显快于送端其他机组,因此火电切机范围选为 10 台配套火电机组。风电切机范围为哈密南和哈密基地全部机组,切机步长  $\Delta P_{FC}$  取 50 MW。为保证紧急控制后系统稳定运行,故障后母线电压上、下限允许值分别取 1.1 和 0.9 pu。

#### 3.1 基于火电机组的紧急切机策略

特高压直流双极闭锁后,送端系统功角和电压发生失稳。若切除整流站全部电容器,并切除 7 台配套火电机组后,送端系统功角与电压恢复稳定,在此期间未发生风电机组脱网。此时系统总切机量为 4620 MW,仿真结果如图 5 所示。750 kV 鱼卡节点电压支持能力不强,潮流转移会导致鱼卡节点电压跌落最为明显。



a. 配套火电机组功角

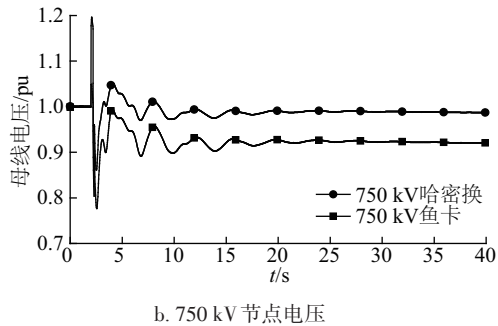


图5 基于火电机组切机方案仿真结果

Fig. 5 Simulation result based on tripping strategy of thermal power units

### 3.2 基于风电优先的紧急切机策略

特高压直流双极闭锁后切除整流站全部电容器。此时单独切除哈密南风电基地和哈密地区风电基地全部风电 2850 MW, 不切除火电机组时, 送端系统功角和电压仍处于失稳状态, 仿真结果如图 6 所示。为恢复系统稳定, 需要继续切除火电机组, 当再切除 5 台火电机组时, 送端系统功角与电压恢复稳定, 此时总切机量为 6150 MW。

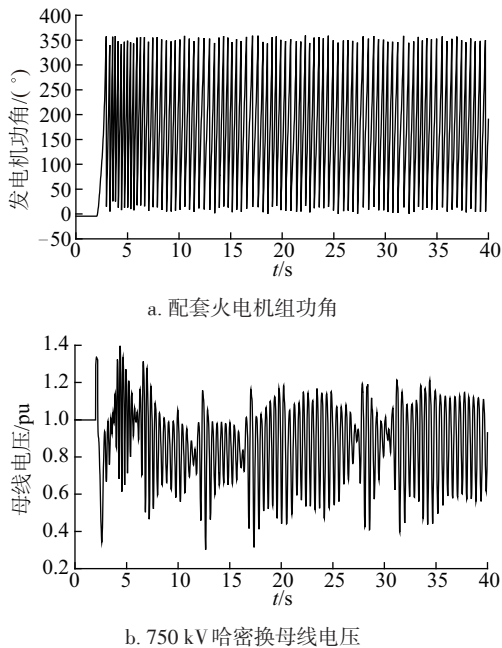


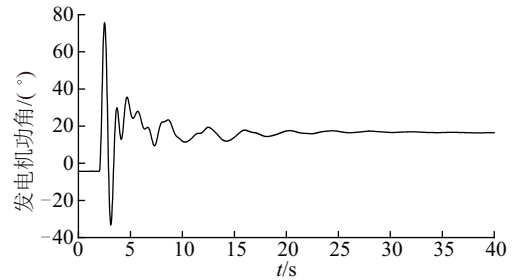
图6 基于风电优先切机方案仿真结果

Fig. 6 Simulation result based on tripping strategy of wind turbines priority

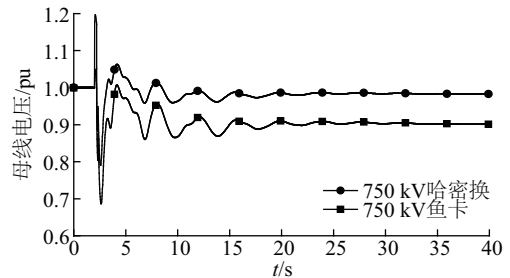
### 3.3 火电与风电协调切机策略

在直流双极闭锁后切除整流站全部电容器, 并

按图 3 所示的控制策略切除火电和风电机组, 可得到当切除 6 台火电机组和 350 MW 风电机组后, 送端系统功角和电压恢复稳定, 且满足约束条件要求, 仿真结果如图 7 所示, 此时送端系统总切机量为 4310 MW。



a. 配套火电机组功角



b. 750 kV 节点电压

图7 风火电协调切机方案仿真结果

Fig. 7 Simulation result based on coordination tripping strategy of thermal power units and wind turbines

### 3.4 风电、火电、电容器协调的优化切机策略

特高压直流双极闭锁后, 根据图 3 所示风火电与电容器协调控制策略对送端系统切机, 可得到如表 1 所示的每轮次切机效果。从表 1 可看出随着电容器切除量的减少, 恢复系统稳定所需的总切机量也随之减少; 当电容器切除量为 1580 Mvar 时所需的总切机量最小, 为 3550 MW。

当电容器切除量继续减少时, 送端系统无法恢复稳定。火电机组切除量过少时, 无法有效减少系统的加速能量, 恢复系统功角稳定。随着火电机组切除数量的增加, 送端系统无功调节能力逐渐降低, 无法平衡盈余的无功, 整流站附近节点电压过高。高电压引起电容器无功功率的正反馈特性, 造成整流站附近节点电压不断上升, 超出正常电压范围, 风电场高电压脱网, 系统电压失稳。图 8 所示为电容器切除量过少时, 送端系统部分母线电压仿真图。

表 1 火电、风电和电容器联合控制方案及效果  
Table 1 Results of the coordination tripping strategy of thermal/wind power units and capacitors

切机 轮次	电容 器切 除量/ Mvar	火电 切除 总量/ MW	风电 切除 总量/ MW	总切 机量/ MW	系统 状态
1	270	6600	2850	9450	失稳
2	540	6600	2850	9450	失稳
3	810	6600	2850	9450	失稳
4	1080	6600	2850	9450	失稳
5	1350	6600	2850	9450	失稳
6	1580	3300	250	3550	稳定
7	1810	3300	300	3600	稳定
8	2040	3300	350	3650	稳定
9	2270	3300	400	3700	稳定
10	2500	3300	500	3800	稳定
11	2730	3300	550	3850	稳定
12	2960	3300	650	3950	稳定
13	3190	3960	50	4010	稳定
14	3420	3960	100	4060	稳定
15	3650	3960	200	4160	稳定
16	3880	3960	350	4310	稳定

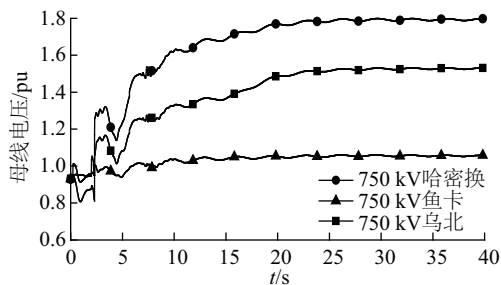


图 8 不切除电容器时送端部分母线电压  
Fig. 8 Bus voltage of the sending end system when capacitors are reserved

### 3.5 4种控制策略效果对比

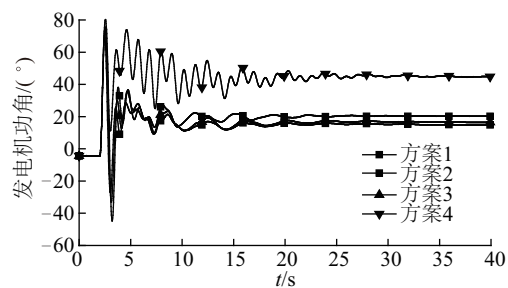
特高压直流闭锁后,送端系统 4 种控制策略效果对比如表 2 所示。对比策略 1~策略 4 可看出先切除风电再切除火电时所需总切机量最大,达到 6150 MW,而只切除火电机组时仅需 4620 MW 即可恢复系统稳定,说明在切除同等容量的风电与

火电机组时,风电机组减少系统加速能量和改善系统功角稳定的效果不如火电机组,证实了切除火电机组比风电机组有利于系统功角稳定;对比策略 1 和策略 3 可看出若只切除火电机组,系统存在过切的现象,比风电与火电联合切除时过切 260 MW;由策略 3 和策略 4 对比可得优化电容器切除量,保留部分电容器,可提升近区母线电压水平,进一步减少有功功率切除量,此时只需切除 3550 MW 即可恢复系统稳定,与不保留电容器时风火协调切机策略相比减少 18.6%切机量。在 4 种控制策略中系统频率均保持稳定。

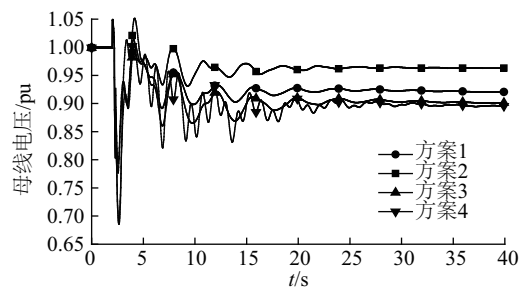
表 2 4种控制策略效果对比  
Table 2 Comparison of four tripping strategies

切机 策略	电容器切 除量/Mvar	火电切除 总量/MW	风电切除 总量/MW	总切机 量/MW
1	3880	4620	0	4620
2	3880	3300	2850	6150
3	3880	3960	400	4360
4	1580	3300	250	3550

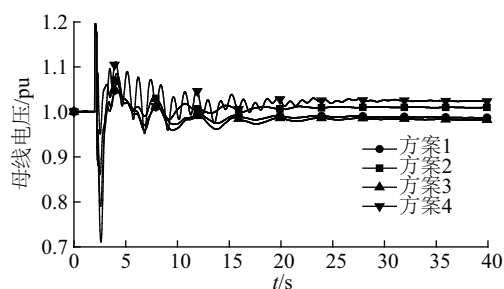
4 种控制策略下配套火电机组功角和部分母线电压对比如图 9 所示。由图 9 可看出在 4 种控制策略下直流闭锁后整流站交流母线暂态压升与持续时间几乎相同,稳态时母线电压均未越限,风电场并网点电压也都处于正常水平。因此保留适量电容器并不会影响系统电压稳定性。



a. 配套火电机组功角对比



b. 750 kV 鱼卡母线电压对比



c. 750 kV 哈密换母线电压对比

图9 4种方案仿真结果对比

Fig. 9 Simulation results comparison of four tripping strategies

综上所述,切机策略4可明显减少系统切机量,并且满足系统功角和电压稳定要求。因此风火打捆系统特高压直流闭锁后,采用风电、火电、电容器协调控制策略能够在保证系统恢复稳定的基础上,有效减少恢复稳定所需切机量,提升了控制的经济性。

## 4 结 论

本文在研究风火打捆系统直流闭锁对送端系统电压与功角稳定性影响的基础上,提出一种基于火电、风电和电容器协调的紧急控制和优化切机策略,以减少直流闭锁后恢复系统稳定所需切机量,为实际工程中直流闭锁后的紧急控制提供参考。

通过理论分析和大量仿真得出以下结论:

1)直流闭锁后产生的加速能量和大规模潮流转移是引起系统功角和电压失稳的主要原因。

2)直流闭锁后保留部分配套电容器可以提升交流外送通道电压水平,提升交流通道外送能力;但电容器和火电、风电切除量配合不当会造成系统电压过高失稳。因此需要协调三者之间的切除量。

3)切除同等容量的火电机组比风电机组更有助于恢复系统功角稳定。

4)基于火电、风电和电容器的紧急控制策略能够在保证直流闭锁后系统稳定的基础上,显著降低送端系统恢复稳定所需切机量,提升了系统的安全性与经济性。

## 【参考文献】

[1] 汪宁渤,王建东,何世恩.酒泉风电跨区消纳模式及其外送方案[J].电力系统自动化,2011,35(22):82—89.

[1] Wang Ningbo, Wang Jiandong, He Shien. Cross border

accommodation method and transmission scheme of Jiuquan wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 82—89.

[2] 郭飞,王智冬,王帅,等.我国风电消纳现状及输送方式[J].电力建设,2014,35(2):18—22.

[2] Guo Fei, Wang Zhidong, Wang Shuai, et al. Consumption situation and transmission modes of wind power in China[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(2): 18—22.

[3] 张强,冯艳虹,王绍德.特高压交流通道风火联合送电问题研究[J].中国电力,2012,45(6):1—4.

[3] Zhang Qiang, Feng Yanhong, Wang Shaode. Research on UHVAC transmission of combined electricity generated from wind and thermal[J]. Electric Power, 2012, 45(6): 1—4.

[4] 穆钢,崔杨,严干贵.确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J].中国电机工程学报,2011,31(1):15—19.

[4] Mu Gang, Cui Yang, Yan Gangui. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 15—19.

[5] 郭小江,赵丽莉,汤奕,等.风火打捆交直流外送系统功角暂态稳定研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22):19—25.

[5] Guo Xiaojia, Zhao Lili, Tang Yi, et al. Study on angle transient stability for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 19—25.

[6] 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.

[6] 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.

[7] 陈树勇,陈会元,唐晓骏,等.风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J].电网技术,2013,37(2):514—519.

[7] Chen Shuyong, Chen Huiyuan, Tang Xiaojun, et al. Generator tripping control to uphold transient stability of power grid outwards transmitting thermal-generated power bundled with wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 514—519.

[8] 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—98.
- [8] Xu Shiyun, Wu Ping, Zhao Bing, et al. Study on security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability wind-thermal combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92—98.
- [9] 钟 显, 樊艳芳, 王一波, 等. 含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 130—138.
- [9] Zhong Xian, Fan Yanfang, Wang Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power, AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 130—138.
- [10] 丁 剑, 邱跃丰, 孙华东, 等. 大规模风电接入下风电机组切机措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(19): 25—36.
- [10] Ding Jian, Qiu Yuefeng, Sun Huadong, et al. Consideration of wind generator tripping under large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 25—36.
- [11] 杨濛濛, 郭 雷, 王春华, 等. 基于改进支路暂态能量函数的风电并网暂态最优切机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 72—77.
- [11] Yang Mengmeng, Guo Lei, Wang Chunhua, et al. Transient optimal tripping control of grid-connected wind farms based on advanced branch transient energy function[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 72—77.
- [12] Gautam D, Vittal V, Harbour T. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1426—1434.
- [13] 林 俐, 吴聪聪, 齐 军. 大规模风火混合送端系统严重故障下的紧急切机策略分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 882—888.
- [13] Lin Li, Wu Congcong, Qi Jun. Analysis of urgent generator tripping control under Serious fault for sending-end system of bundled thermal/wind power[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 882—888.
- [14] 董 哲, 周 明, 李庚银, 等. 针对风电外送基地的暂态切机决策模型[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1348—1354.
- [14] Dong Zhe, Zhou Ming, Li Gengyin, et al. A transient tripping decision-making model for sending-out wind power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1348—1354.
- [15] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [15] Zhao Wanjun. HVDC transmission projects technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [16] Kundur P. Power system stability and control [M]. New York: Mc Graw-Hill Inc., 1994.
- [17] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015—1022.
- [17] Liu Zhenya, Zhang Qiping, Wang Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in the Northwest China [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015—1022.
- [18] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 182—188.
- [18] Ni Yixin. Theory and analysis of dynamic power system [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 182—188.
- [19] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电场对电力系统阻尼影响的转矩分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 152—158.
- [19] Hao Zhenghang, Yu Yixin. Torque analysis for the influence of DFIG-based wind farm on damping of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 152—158.
- [20] 吴 萍, 陈 昊, 赵 兵, 等. 风光火打捆交直流混联外送系统交互影响及稳定性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1934—1942.
- [20] Wu Ping, Chen Hao, Zhao Bing, et al. Study on interaction and stability characteristics of bundled wind-PV-thermal power transmitted with AC/DC system [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1934—1942.

## RESEARCH OF URGENT CONTROL STRATEGY UNDER HVDC BLOCK FOR WIND-THERMAL-BUNDLED SENDING END SYSTEM

Ding Ming<sup>1</sup>, Zhang Yan<sup>1</sup>, Han Pingping<sup>1</sup>, Zhang Haitian<sup>1</sup>, Li Binbin<sup>2</sup>

(1. *Anhui New Energy Utilization and Energy Saving Laboratory (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;*

*2. Anhui Electrical Power Research Institute, Hefei 230601, China)*

**Abstract:** Based on the analysis of the influence of HVDC block on the voltage characteristics of the sending end system, a thermal/wind power units and capacitors coordinated urgent control and optimal tripping strategy was proposed. This strategy optimizes the capacitor amount of the rectifier station and the distribution amount of thermal power and wind power aiming at the minimum total amount of tripped units. At last, validity and practicability of the proposed strategy was verified based on an actual wind-thermal-bundled HVDC transmission system in Northwest China.

**Keywords:** HVDC power transmission; wind power; capacitors; HVDC block; coordinated control