

## 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方法研究

常海军<sup>1</sup>, 霍超<sup>2</sup>, 李威<sup>1</sup>, 牛拴保<sup>2</sup>, 任先成<sup>1</sup>, 柯贤波<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 211102; 2. 西北电力调控分部, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 跨大区电网互联、大容量直流输电及第三道防线动作的延时和不确定性对紧急控制技术提出了更高要求。缺乏快速主动控制措施是导致电网联络线解列后大量潮流跨网转移和孤网内安全稳定形势恶化演化, 继而引发系统相继解列和最终崩溃的关键原因。在分析总结导致电网解列的因素和解列后孤网面临的主要安全稳定问题基础上, 提出了“离线-在线”相协调的包括控制主站、控制信息子站和执行站三层结构控制的基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方案。通过离线基于性价比、在线基于量化的交直流控制措施的控制性能指标完成策略的搜索和优化制定, 确保电网紧急状态解列后具有快速主动有序的控制措施。仿真验证了方案的可行性。

**关键词:** 解列; 孤网; 主动; 紧急控制; 性价比; 量化控制性能指标

### Research on emergency control scheme of isolated power grid based on splitting information triggering

CHANG Haijun<sup>1</sup>, HUO Chao<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, NIU Shuangbao<sup>2</sup>, REN Xiancheng<sup>1</sup>, KE Xianbo<sup>2</sup>

(1. Nanjing NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. Northwest China Power System Dispatching & Control Branch Center, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Cross-regional power grid interconnection, high-capacity DC power transmission and the operating characteristics of delay and uncertainty with the third defense line of power system put forward more advanced demand on emergency control technology. The analysis of recent catastrophic blackouts occurred in many countries points out that the cross-grid large-capacity power flow transfer and continuing to deterioration of the security and stability situation of isolated power grid after power grid tie-line splitting due to lack of rapid active control measures are the key cause that power system occurs seriously events, such as successive splitting, even collapse of power system. On the basis of analyzing the factors that probably cause power grids separation and the problems of safety and security for the isolated power grid after power grid tie-line splitting, an emergency control scheme of isolated power grid based on splitting information triggering is presented, which adopts the method of delaminated control involving compound master control station, control information substation and execution control station and the coordination control of off-line & on-line. Through cost performance with off-line and the quantized control index between AC/DC control measures with on-line to search the optimal control strategies, it is ensured that quick, active and sequential control measures can be obtained with the emergency state of the isolated power grid after power system separation. The method is verified by simulation.

**Key words:** splitting; isolated power grid; active; emergency control; cost performance; quantized control index

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2016)02-0027-09

## 0 引言

通过牺牲整个主系统的完整性, 解列控制可以避免可能或已经失步的电力系统演化为不受控的全

**基金项目:** 西北电网有限公司科技项目(大规模新能源集中接入方式下特高压直流弱送端电网安全稳定协调控制技术研究); 国家电网公司科技项目(基于稳定性量化分析的大电网多断面暂态稳定交互影响及协调控制技术研究)

面瓦解, 但本身并不能解决振荡中心两侧子网中供需尽可能平衡问题, 不能阻止电网安全性的局部进一步恶化。而随着电力系统的快速发展, 新能源及直流在电网中占的比重越来越大, 电网扰动情况更复杂<sup>[1]</sup>, 电网之间的联系越来越紧密, 电网的规模越来越大, 交直流交互影响更加密切, 解列后子网的规模亦愈加庞大, 网内交互影响愈加密切, 一旦系统因电网扰动发生解列, 将可能引起子网内大规模的潮流跨网转移和多种安全稳定形态并存的局

面,如果解列后继控制措施不当,局面将会进一步恶化演化,可能激发网内直流闭锁、大规模机组跳闸、联络线开断、电压崩溃、功角失步、解列等严重相继事件或连锁故障<sup>[2-5]</sup>的发生,并最终导致停电事故的发生。国内外历次大停电事故<sup>[6-9]</sup>也印证了这一点,它们都经历了电网元件无序开断导致电网解列为多个子网的过程,解列后因缺乏高效、快速的控制手段而最终导致解列后的孤立电网崩溃。因此,加强对解列后继控制的研究对于防止现代电力系统紧急状态下事故的蔓延扩大至关重要。

三道防线是构成我国电力系统防御体系的重要组成部分,其中作为第二道防线的紧急控制(EC)和作为第三道防线的校正控制(CC)原则上都可以作为电网解列后的控制手段,但由于执行时机和控制规律上的不同,效果自然也就不同,前者属于预测性控制,控制时机早,效果好,但控制精度难以保证;后者属于反馈型控制,控制时机晚,控制代价大,但控制精度高。传统电力系统中普遍采用后者作为解列后控制手段,然而作为保底的第三道防线在近来国内外停电事故中暴露出某些不足和缺陷<sup>[9]</sup>,使其存在失守的风险。文献[10-14]结合国内外电网事故阐述了目前第三道防线存在振荡中心转移导致预设的解列点装置不能动作、有功功率缺额较大导致低频自动减负荷滑差闭锁、联络线相继开断造成潮流大转移,可能引起受端系统电压不稳定,而低压减载装置又可能被闭锁或切除太慢延误了时机等方面存在的问题,分析讨论了解列后采取集中切机/切负荷的必要性和基于风险观点上的经济合理性,指出现代电力系统稳定控制对于加强二、三道防线协调和在线紧急控制的迫切要求。

中国的《电力系统安全稳定控制技术导则》<sup>[15]</sup>规定:当联络线跳闸导致系统内功率缺额过大或过剩过大时,宜采取跳闸联切措施;负荷中心的区域电网在主要受电断面联络线全部断开或部分断开引起潮流大量转移时,可采取在送电端切机、受电端集中切负荷的措施。集中切机/切负荷控制在中国的多个电网互联和远距离输电工程中得到了实际应用<sup>[16]</sup>。本文结合上述研究情况,考虑了控制措施的性价比,提出了基于解列信息触发针对孤立电网安全稳定的紧急控制方案,由于是采用基于解列事件触发的控制手段,故称其为紧急控制,与《电力系统安全稳定导则》<sup>[17]</sup>规定的第二道防线内涵是一致的,但在严重故障类型、控制的触发信息方面向第三道防线(低压解列、失步解列)进行了拓展和深化,为实现大停电的时空协调防御提供了技术支撑。

## 1 导致电网解列的因素

通常情况,在电力系统遭受扰动可能或已不能维持同步运行情况下,主要通过安自装置实现对电网的解列控制,其控制方式分为两类,一类为由故障驱动的预测型解列控制,另一类为由轨迹驱动的反馈型解列控制<sup>[18]</sup>。前者主要基于离线典型工况下故障仿真分析和策略表经实时匹配成功后执行。目前主要针对《电力系统安全稳定导则》中规定的第二道防线范围的故障进行分析,但实际导致电网解列的可能涉及  $N-1$ 、 $N-3$  及以上多重元件的故障,因此,需要拓展其故障检测范围;后者主要基于实际电网故障后动态过程中的受扰轨迹是否满足第三道防线解列装置动作判据执行。

除以上电网主动解列情况外,还包括电网联络线、联络变压器或母线故障、继电保护动作等导致电网被动解列的情况,在以往国内外事故<sup>[19]</sup>中均有体现。

基于目前实际电网分析,导致电网解列的因素可概括为以下几个方面:

### (1) 互联通道元件故障导致电网解列

表现在电网互联通道薄弱断面  $N-1$ 、 $N-2$  故障导致大电网直接解列或系统发生群发性故障后,联络断面直接开断而导致区域电网或大电网解列。

### (2) 严重故障后安控失配、拒动或控制量不足下大规模潮流转移引发电网解列

表现在大容量直流闭锁故障或网内大电厂全停故障后安控失配、拒动或控制量不足情况下不平衡功率大范围转移,可能导致相关交流断面功率增加,可能引发低压或失步等基于不安全信息的解列装置动作,并最终导致局部电网或大电网解列。

### (3) 解决局部稳定问题的安控动作导致电网解列

表现在电网互联结构的改变使得原有针对局部问题的安控策略在极端方式下可能不再适应互联结构改变后的电网的安全稳定要求,若仍按原有的动作判据和控制策略动作后可能导致相关交流断面功率增加,可能引发低压或失步等基于不安全信息的解列装置动作,最终导致电网解列。

### (4) 电网局部地区短路故障可能导致远方输电断面开断,导致系统解列

表现在极端方式下电网局部地区短路故障后可能导致大区电网机组暂态失稳<sup>[20]</sup>、联络断面暂态电压跌落严重,低压或失步等基于不安全信息的解列装置可能动作,导致系统解列。

## 2 解列后孤立电网的主要安全稳定问题

受电网解列后子网内不平衡功率、潮流转移及

动态无功支撑不足的影响,送/受端孤立电网可能存在一系列安全稳定问题:

(1) 解列后受端孤立电网主要存在低频、低压、低频低压并存及功角失稳的问题,其中局部电网解列后受端孤立电网以低频、低压、低频低压并存问题为主,大电网解列后,受端孤立电网以低频和功角失稳问题为主;

(2) 解列后送端孤立电网主要存在高频、功角失稳的问题,其中局部电网解列后送端孤立电网以高频问题为主,大电网解列后,送端孤立电网以功角失稳问题为主。

### 3 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方案

随着我国特高压交直流混合电力系统的逐步形成,电网形态日趋复杂,电网的安全稳定控制面临巨大的挑战。传统电力系统紧急控制通常基于典型工况进行离线仿真分析并制定策略表,与系统实时工况匹配成功后执行。但实际电网运行时即使保护与控制装置的故障识别判据和动作逻辑与电网的实时运行动态相适应,但灵活多变的电网运行工况也可能造成既定控制的欠配、过量,甚至与意图相反的效果,因此,本文提出了“离线策略制定,在线策略校核”相协调的基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方案,以便实时做出更新控制策略的决策,确保电网出现紧急状态时具有主动有序的控制措施。

#### 3.1 离线与在线协调控制策略

##### 3.1.1 离线与在线协调控制策略

###### (1) 解列后孤网模式筛选

充分考虑电网的结构、运行方式等特点,基于离线典型方式,结合上述可能导致电网解列的因素进行时域仿真分析,筛选典型的解列场景及解列后存在安全隐患的孤立电网。

###### (2) 孤立电网紧急控制方案构建

针对大电网或局部电网解列后受端孤立电网存在的低频、低压或两者并存的电网安全问题可通过切负荷、紧急回降网内送出直流功率、提升网内受入直流功率解决;而对于大电网解列后受端孤立电网可能存在的低频、低压及功角稳定并存的问题,需基于 EEAC 分群理论,在孤立电网内余下群机组所在区域实施以上控制措施,避免同一个电网内出现相斥的控制措施而导致控制量的增加或新的安全稳定问题的发生。

同样,针对大电网或局部电网解列后送端孤立电网存在的高频电网安全问题可通过切机、紧急提

升网内送出直流功率、紧急回降网内受入直流功率解决;而对于大电网解列后送端孤立电网可能存在的高频及功角稳定并存的问题,可在孤立电网内领前群机组所在区域实施以上控制措施进行解决。

在以上基础上,从控制判据、信道构建等方面确定解列后不同孤网模式下的控制主站,明确各控制子站及措施执行站的功能定位及信息交互,给出各孤网模式下的候选控制措施空间,构建孤网紧急控制方案,如图 1 所示。

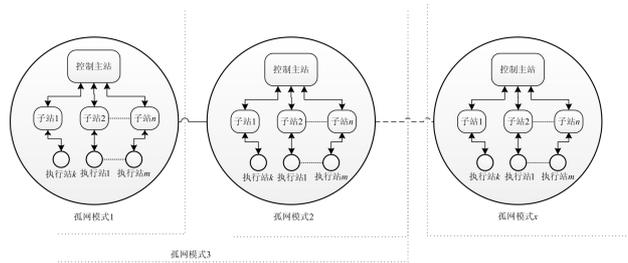


图 1 孤网紧急控制方案示意图

Fig. 1 Diagram of isolated power grid emergency control scheme

###### (3) 孤立电网紧急控制策略制定

在确保电网安全稳定前提下,考虑控制的经济性,就需要对候选控制措施空间进行优化,选择控制代价最小的控制策略。

###### a. 控制的优化模型

针对具体工况和电网解列故障,紧急控制决策的目标是在所有可选措施中搜索使得系统安全稳定且控制代价最小的措施组合,其数学模型可描述为如式(1)所示的非线性优化规划问题<sup>[21]</sup>。

$$\begin{aligned} \min J &= \sum_{j=1}^l C_j n_j \\ \text{s.t. } &\eta(n_1, n_2, \dots, n_l) > \varepsilon \\ &n_j \leq n_{j,\max} \quad (j=1, 2, \dots, l) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $J$  为目标函数;  $l$  为交直流控制措施数量;  $C_j$  为第  $j$  种控制措施的控制代价;  $n_j$  为第  $j$  种控制措施的控制量;  $n_{j,\max}$  为第  $j$  种控制措施的最大可控量;  $\varepsilon$  为给定的小正数,为安全稳定裕度的阈值;  $\eta$  为安全稳定裕度,包括功角、电压、频率安全稳定裕度,由基于实际受扰轨迹的量化理论提供。

###### b. 紧急控制策略优化流程

目前,已有的紧急控制策略优化方法已可实现解列后孤立电网的交直流、多源切机间的协调优化。通过对不同控制措施的摄动,基于实际受扰轨迹的量化理论可以计算每种控制措施的控制灵敏度,进而计算控制的性能代价比,如式(2)所示。

$$W_k = \Delta \eta_k / \Delta C_k \quad (2)$$

式中,  $W_k$  为某一措施解决安全稳定问题的性能代价比, 表示为采取措施后系统稳定裕度的变化量与控制代价之比。搜索方向按  $W_k$  最大的措施增加(当起始点不稳定时)或按  $W_k$  最小的措施减小(当起始点稳定时), 这样可以保证在搜索过程中引入约束条件的影响。基于控制性能代价比的紧急控制策略搜索优化方法主要基于不同控制措施的控制性能代价比排序, 由系统不稳定点出发, 通过迭代求取使得系统安全稳定的解作为紧急控制的优化解。其求解流程如图 2 所示。

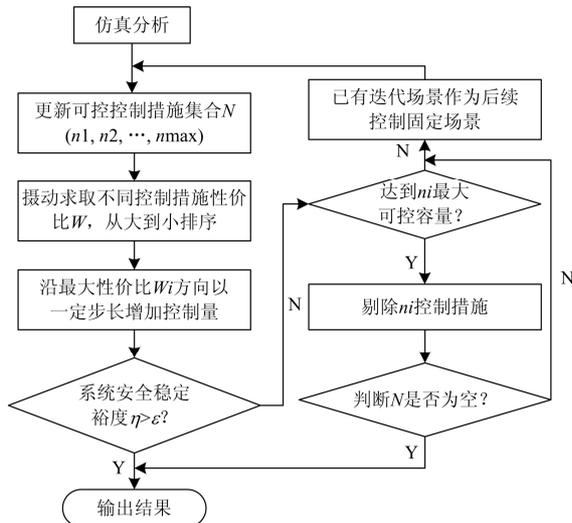


图 2 基于性价比迭代寻优的紧急控制优化流程

Fig. 2 Emergency control optimization process based on cost performance

具体步骤如下:

- a. 通过仿真分析系统的安全稳定性, 并给出安全稳定裕度。
- b. 针对安全稳定裕度小于阈值  $\epsilon$  的故障, 求取各候选措施的控制性能代价比  $W_k$ 。
- c. 沿控制性能代价比最大的方向, 按一定步长增加控制量, 并校核系统的安全稳定程度, 若安全稳定, 则作为优化解结束迭代, 若不满足安全稳定要求, 则转入步骤 d。
- d. 判别本次所增加的控制措施  $n_j$  是否达到最大值, 若没有达到最大值则转入步骤 e; 若达到最大值, 则在候选控制措施中剔除措施  $n_j$ , 并判别候选控制空间是否为空集, 若为空集, 则输出结果, 若候选控制空间不为空, 则转入步骤 e。
- e. 将已有控制措施作为固定场景, 重新求取候选控制空间中剩余控制措施的性能代价比, 并按照新的性价比排序转入步骤 c。

通过上述方法, 在候选控制措施充足的条件下,

一般可以找到满足安全稳定约束的可行解, 但可能陷入局部最优解, 而不是全局最优解。为了解决上述问题, 在此基础上仍需要从系统的安全稳定解出发基于性价比进一步进行优化。优化的流程如图 3 所示。

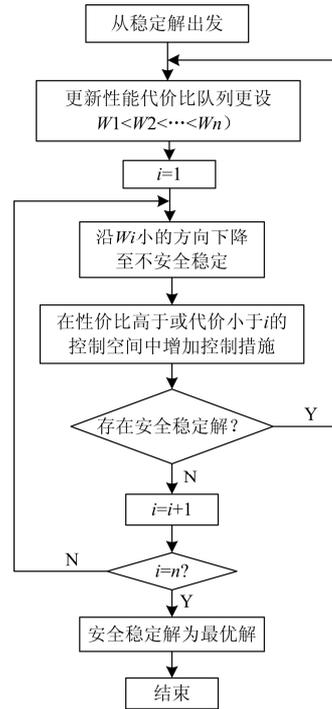


图 3 紧急控制的全局最优解求取流程

Fig. 3 Calculating process of the global optimal solution of emergency control

为保证最终搜索的结果是代价最小而非  $W$  权值最小, 在每步搜索的  $W_i$  子空间中, 还必须加入比控制措施  $i$  代价小的状态量。

搜索过程的基本思路是沿性能代价比最小的方向  $i$  下降至系统不安全稳定, 再在性能代价比高于  $W_i$  的候选措施空间中求取更合理的稳定解, 直至对某一安全稳定解在所有方向都无法找到新的安全稳定解。搜索的关键在于: 对于一稳定解, 当在其  $W_i$  方向下降到不稳定后, 如果相应空间没有安全稳定解, 并不认为找到了最优解, 而是对所有可下降方向均确认这一点后, 才认为这一解为最优, 这样就避免了陷入局部最优解。

工程实用中一般在采用如图 3.2 所示的优化流程即可满足控制需求。这种方法需要迭代计算不同措施在不同调整步长下的性能代价比  $W_i$ , 所需的计算量较大, 但能够精确反映随着运行方式变化各控制措施的性能代价比变化情况, 适合于对控制时间要求不高的场合。

### 3.1.2 在线策略校核及决策

在线策略校核及决策主要包括三个部分。

#### (1) 解列后孤立电网安全稳定评估

基于在线方式下电网实时运行工况信息进行解列后孤立电网的安全稳定评估。

#### (2) 解列后孤立电网紧急控制策略适应性校核

根据在线运行方式实时搜索系统可能的解列场景, 校核离线紧急控制策略的适应性。

a. 针对离线方式下没有覆盖的严重解列场景需要增加制定相应的紧急控制策略。

b. 针对与离线方式策略相匹配的解列场景, 基于离线制定的孤立电网紧急控制策略, 诊断在线方式下可用的候选控制措施空间, 校核离线紧急控制策略的适应性。针对控制量不足的策略需要在线追加一定的紧急控制量。

#### (3) 解列后孤立电网紧急控制策略在线决策

a. 在线紧急控制策略制定: 一是针对离线方式没有覆盖的解列场景在线新增相对应的基于解列信息的孤立电网紧急控制策略; 二是针对离线方式下制定的控制策略不适应的孤立电网在线进行策略的优化调整。

为满足在线决策对于计算速度的要求, 需要结合在线方式下可用的候选控制措施空间, 通过量化的交直流控制措施的控制性能指标<sup>[22-23]</sup>, 快速搜索并制定可行的紧急控制策略。

b. 电网运行方式调整: 针对离线策略不适应的情况, 给出在线运行方式及有效控制措施约束条件下的孤立电网外送或受入功率极限, 并基于控制性能指标给出电网运行方式调整策略, 以供电网运行、调度人员决策参考。

## 3.2 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制系统方案研究

为避免目前大型交直流混联电网经扰动解列后孤网内发生大规模潮流跨网转移引起新的连锁或相继电网安全稳定问题并最终导致孤网崩溃的风险, 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制系统结合离线与在线方式分析计算, 考虑系统可能的解列场景和孤网模式, 针对存在安全稳定隐患的孤立电网通过集中切机、切负荷、直流调制等紧急控制措施, 并在第一时间由解列信息触发控制装置执行, 避免孤立电网相继解列或崩溃。

基于解列信息触发的孤立电网紧急控制系统包括综合控制主站、控制子站、执行站三层结构, 如图4所示, 各站功能如下。

a. 综合控制主站: 为整套系统的枢纽和核心, 与控制信息子站和执行站进行信息交换, 识别电网

方式和有用的候选措施空间, 进行离线策略在线匹配校核, 针对不适应的进行在线快速紧急控制策略制定或追加。在线判断系统解列场景和孤网模式, 向子站发送控制命令。

b. 控制信息子站: 为整套系统的中间环节, 负责监视重要联络线路输送功率及方向信息, 识别联络线开断信息, 上送给主站。

c. 执行站: 位于整套系统的末端。负责监视电网可用控制措施运行状态, 并上送至主站; 接收主站下发的控制命令, 并按要求选择被控对象, 实施切机、切负荷、直流调制等控制。

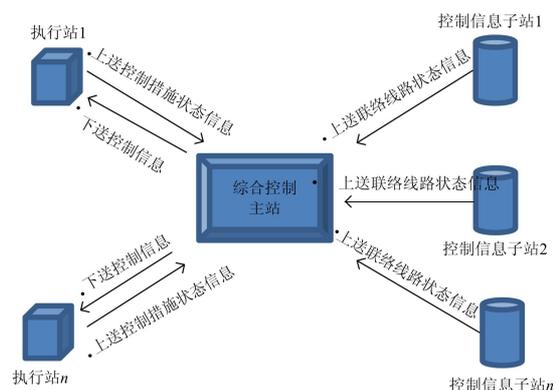


图4 基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方案示意图

Fig. 4 Diagram of emergency control scheme of isolated power grid based on splitting information triggering

在实际电网中, 解列装置动作信号可直接接入综合控制主站作为触发紧急控制的信号, 而综合控制主站可由稳控系统组成, 并执行相关紧急控制指令。

## 4 算例

(一) 以某A实际规划电网典型方式为例, 如图5所示, 黑粗实线为高电压等级线路, 细实线为低电压等级线路, ab线N-2故障且其安控拒动情况下

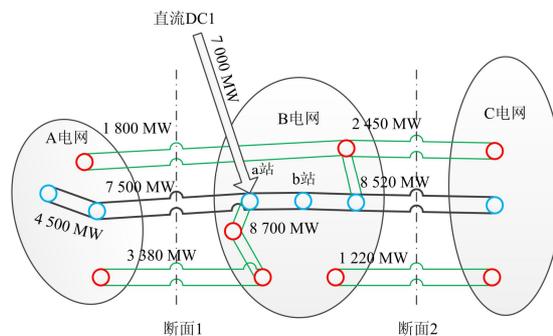


图5 某实际规划电网典型方式示意图

Fig. 5 Diagram of a practical planning power grid

将导致 A 电网、B 电网机组相对 C 电网失稳，而断面 2 解列装置动作后，A 电网与 B 电网成为孤立电网，但 A 电网仍存在机组相继失稳的风险。

(1) 故障的演化过程

典型方式下 ab 线发生 N-2 严重故障，考虑安控拒动，A 电网、B 电网机组发生首摆失稳，系统功角响应曲线如图 6 所示。

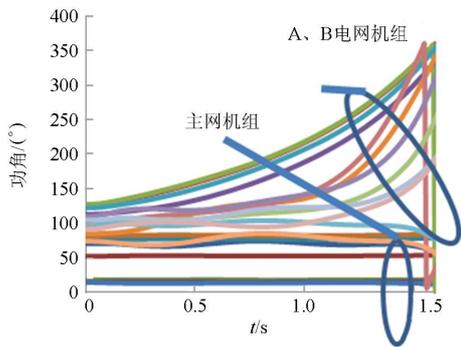


图 6 典型方式下线路 ab N-2 故障且安控拒动下系统功角响应曲线

Fig. 6 Generator angle response curves when the automatic control device of security and stability failure with "N-2" line ab fault under the typical way

考虑断面 2 的低压解列装置动作后，A、B 电网相对主网孤网，孤网后，A 电网机组相继失稳，功角响应曲线如图 7 所示。

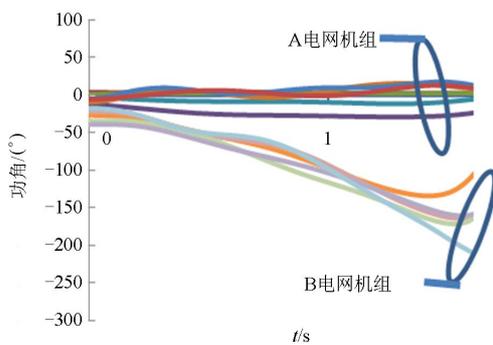


图 7 断面 2 解列后功角响应曲线

Fig. 7 Generator angle response curves when section two splitting

(2) 基于解列信息触发的紧急切机方案

通常情况下，在临界群<sup>[24]</sup>机组的领先群切除部分机组，可提高系统安全稳定性。离线分析也表明，在断面 2 解列的同时，联切部分 A 电网机组，除了可解决 A、B 孤网内的高频问题，还可提高系统稳定裕度。因此，为抑制 A、B 电网存在的相继失步问题，可采取解列连锁切机的措施。将 B 电网稳控

系统和断面 2 解列控制系统通信，以断面 2 解列作为安控系统触发信号，联切 A 电网机组，抑制 B 电网和 A 电网相继失稳。

(二) 以某地区实际规划 B 电网典型方式为例，如图 8 所示，其中，A 站主变中压侧接入直流换流站，外送直流功率为 4 000 MW，黑粗实线为高电压等级线路，细实线为低电压等级线路。介绍不同解列场景下基于解列信息触发紧急切机和直流调制进行孤立电网频率安全控制的实例。

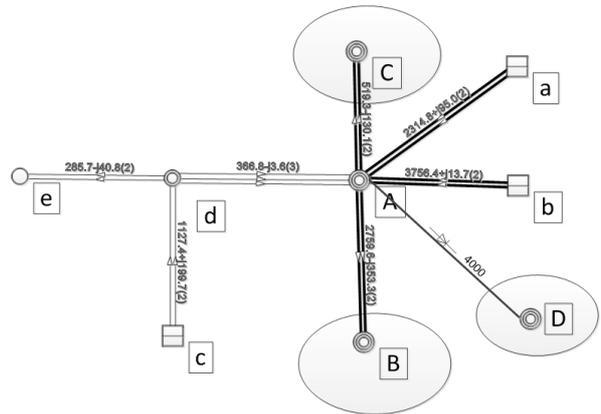


图 8 B 规划电网典型方式示意图

Fig. 8 Diagram of planning power grid B

(1) 不同解列场景下孤网特性

典型方式下，A 站双主变与 ed 联络线开断后(解列场景一)，A 站下低压系统带直流孤网运行，功率缺额 2 600 MW，系统因低频频率崩溃，稳态电压低于 0.89 p.u.，如图 9 所示。

同时，典型方式下，AC、AB、ed 联络线开断后(解列场景二)，系统带直流孤网运行，功率过剩 3 560 MW，最高频率 51.5 Hz，稳态频率 50.8 Hz，系统存在高频问题，如图 10 所示。

(2) 不同解列场景下基于解列信息的紧急控制系统方案

通过构建如图 11 所示的紧急控制系统，将 A 安控站设为紧急控制决策主站，负责采集主变及联络线开断信息，并判别、匹配电网解列的判据，计算和下达控制命令，同时设置 A、B、C、e 等控制信息子站，负责检测相关线路或主变开断信息，设置 A 直流控制执行站，负责监视直流运行信息并上送给 A 决策主站，执行直流调制命令，设置 a、b 切机执行站，负责监视机组的运行信息并上送给 A 决策主站，执行切机命令。

通过上述控制系统，基于不同的解列信息，分别执行如下控制措施后可有效抑制孤立电网频率安全问题：

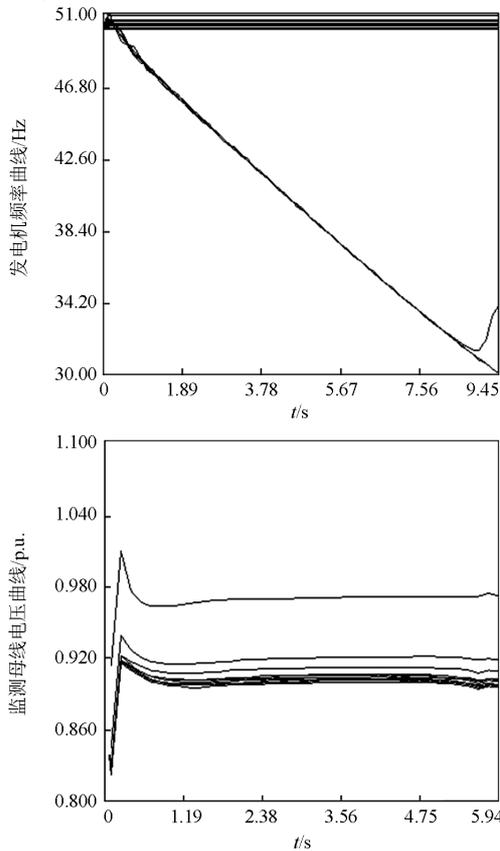


图 9 解列场景一下孤网系统电压、频率响应曲线

Fig. 9 Frequency and voltage response curve of isolated power grid under the splitting scene one

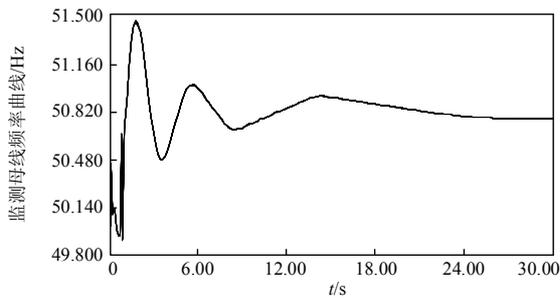


图 10 解列场景二下孤网系统频率响应曲线

Fig. 10 Frequency response curve of isolated power grid under the splitting scene two

(1) 典型方式, 解列场景一下执行紧急回降 AD 直流 3 000 MW 措施, 孤网内电压稳定, 暂态最低频率 49.46 Hz, 稳态频率 49.82 Hz, 满足电压、频率安全要求, 如图 12 所示。

(2) 典型方式解列场景二下, 执行切 a 电厂 2 台机(2 000 MW)、b 电厂 1 台机(600 MW)后孤网内暂态最高频率 50.59 Hz, 稳态频率 50.39 Hz, 满足电网安全要求。

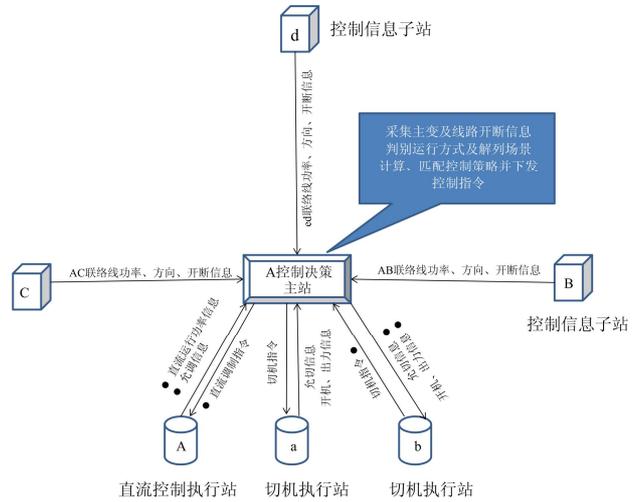


图 11 B 规划电网直流孤岛运行紧急控制方案

Fig. 11 Scheme of the emergency control system for DC islanding operation of planning power grid B

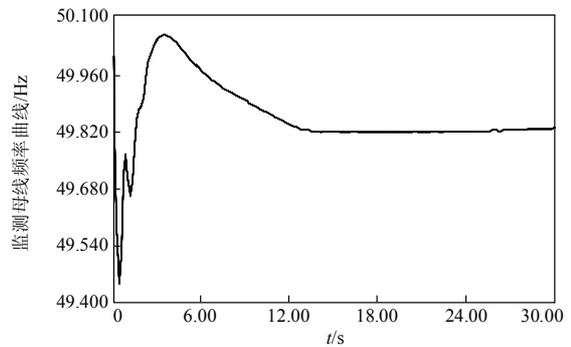
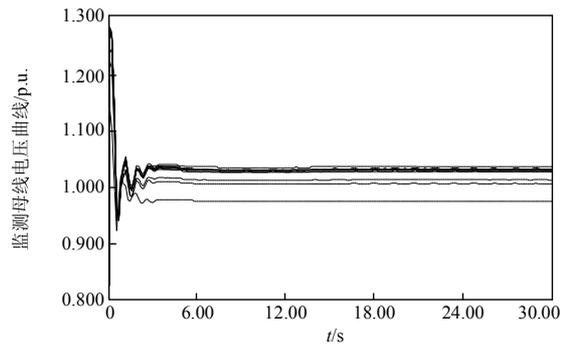


图 12 孤网运行电压、频率响应曲线

Fig. 12 Frequency and voltage response curve of isolated power grid

## 5 总结

随着电力系统的发展和技术的提高, 不同于传统仅仅以相互功率支援为目的的电网互联, 远距离、大容量、交直流混联跨大区输电成为近代电网互联建设的主题, 这种背景下, 电网解列后孤网规模更大、潮流转移更多、特性更复杂, 对控制的要求更

高, 基于轨迹响应动作的电网最后一道防线即传统的第三道防线控制的时滞性和不确定性可能面临失守风险, 因此, 需加强二、三道防线的协调, 拓展第二道防线的内涵, 以应对新形势下电网解列后可能面临的孤网相继解列和系统最终的崩溃。

本文分析总结了导致互联电网解列的因素和解列后电网面临的主要安全稳定问题, 提出基于“离线-在线”相协调的包括综合控制主站、控制信息子站和执行站三层控制结构的基于解列信息触发的孤立电网紧急控制方案, 通过离线基于性价比、在线基于量化的交直流控制措施的控制性能指标完成控制策略的搜索和优化制定, 确保电网解列后具有快速主动有序的控制措施。

### 参考文献

- [1] 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): 92-99.  
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.
- [2] 刘友波, 胡斌, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(一)相关理论方法与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 148-155.  
LIU Youbo, HU Bin, LIU Junyong, et al. Power system cascading failure analysis theories and application I — related theories and applications[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 148-155.
- [3] 黄淼, 黄敏, 庄凯, 等. 一起连锁故障的仿真模拟和理论分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 139-145.  
HUANG Miao, HUANG Min, ZHUANG Kai, et al. Simulation and theoretical analysis of a cascading fault [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 139-145.
- [4] 蔡晔, 曹一家, 谭玉东, 等. 基于标准化结构熵的电网结构对连锁故障的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 36-43.  
CAI Ye, CAO Yijia, TAN Yudong, et al. Influences of power grid structure on cascading failure based on standard structure entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 36-43.
- [5] 常海军, 侯玉强, 任先成, 等. 电网暂态相继失稳风险评估及协调阻断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 40-47.  
CHANG Haijun, HOU Yuqiang, REN Xiancheng, et al. Research on risk assessment and coordinated blocking of transient successive instability in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 40-47.
- [6] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.  
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [7] 甘德强, 胡江溢, 韩祯祥. 2003年国际若干停电事故思考[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 1-4, 9.  
GAN Deqiang, HU Jiangyi, HAN Zhenxiang. Pondering over the worldwide blackout events in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 1-4, 9.
- [8] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析与启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.  
TANG Yong, BU Guanquan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian power grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [9] 印永华, 郭剑波, 赵建军, 等. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-11, 16.  
YIN Yonghua, GUO Jianbo, ZHAO Jianjun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected north America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-11, 16.
- [10] 孙光辉, 吴小辰, 曾勇刚, 等. 电网第三道防线问题分析及失步解列解决方案构想[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 1-11.  
SUN Guanghui, WU Xiaochen, ZENG Yonggang, et al. Analysis on the problems about the third defense line of power systems and the concept of dealing with the separation relay after loss of synchronism[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(3): 1-11.
- [11] Enquiry Committee. Report of the enquiry committee on grid disturbance in northern region on 30th July 2012 and in northern, eastern & north-eastern region on 31st July, 2012[R/OL]. [2012-08-16]. [http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID\\_ENQ\\_REP\\_16\\_8\\_12.pdf](http://www.powermin.nic.in/pdf/GRID_ENQ_REP_16_8_12.pdf).
- [12] 方勇杰. 用紧急控制降低由输电断面开断引发系统崩溃的风险: 对印度大停电事故的思考[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 1-6.  
FANG Yongjie. Application of emergency control to

- reduce risk of system collapse triggered by power transmission interface tripping: thinking on the India power blackouts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 1-6.
- [13] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 1-10.
- XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.
- [14] 杨德友, 蔡国伟. 基于广域局部量测信息的复杂电力系统自适应低频保护策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 266-275.
- YANG Deyou, CAI Guowei. Adaptive under frequency load shedding schemes for complex power systems using local measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 266-275.
- [15] GB/T26399—2011 电力系统安全稳定控制技术导则[S]. 北京: 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 2011.
- GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011.
- [16] 肖世杰. 电网安全稳定控制应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [17] DL/755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001.
- DL/755-2011 guide on security and stability for power system[S]. Beijing: State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China, 2001.
- [18] 王达, 薛禹胜, WU Q H, 等. 故障解列与失步解列的协调优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 1-6, 16.
- WANG Da, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of fault-driven splitting and out-of-step splitting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 1-6, 16.
- [19] 滕予非, 张华, 汤凡, 等. 偏远地区小电网与主网解列后高频高压风险及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 41(1): 129-136.
- TENG Yufei, ZHANG Hua, TANG Fan, et al. Over-frequency and overvoltage risk of isolated small power grid in remote area and its suppression strategy [J]. Power System Protection and Control, 2015, 41(1): 129-136.
- [20] 任先成, 李威, 薛禹胜, 等. 互联网失稳模式演化现象及影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 9-16.
- REN Xiancheng, LI Wei, XUE Yusheng, et al. Unstable modes evolution and its influencing factors analysis in interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 9-16.
- [21] 陈永红, 薛禹胜. 区域紧急控制的优化算法[J]. 中国电力, 2000, 33(1): 44-48.
- CHEN Yonghong, XUE Yusheng. Optimal algorithm for regional emergency control[J]. Electric Power, 2000, 33(1): 44-48.
- [22] 徐泰山, 薛禹胜, 鲍颜红, 等. 电力系统暂态安全稳定模式中元件参与因子识别方法: 中国, 200910026801 [P]. 2009-11-04.
- XU Taishan, XUE Yusheng, BAO Yanhong, et al. Method for identifying element participation factors of the security and stability of power system transient model: China, 200910026801[P]. 2009-11-04.
- [23] 徐泰山, 薛禹胜, 鲍颜红, 等. 一种电力系统暂态稳定切负荷控制有效性评价指标计算方法: 中国, 2013105042538[P]. 2009-11-04.
- XU Taishan, XUE Yusheng, BAO Yanhong, et al. A power system transient stability load shedding control effectiveness evaluation method: China, 2013105042538 [P]. 2009-11-04.
- [24] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论 —— 非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.

收稿日期: 2015-04-09; 修回日期: 2015-07-03

#### 作者简介:

常海军(1981-), 男, 工程师, 研究方向为大电网安全稳定分析与控制; E-mail: changhaijun@sgepri.sgcc.com.cn

霍超(1982-), 男, 高级工程师, 研究方向为电网安全稳定运行与控制;

李威(1978-), 男, 研究员级高工, 博士, 主要研究方向为大电网安全稳定分析与控制。

(编辑 葛艳娜)