

## 电网暂态相继失稳风险评估及协调阻断方法研究

常海军<sup>1</sup>, 侯玉强<sup>1</sup>, 任先成<sup>1</sup>, 李勇<sup>2</sup>, 刘福锁<sup>1</sup>, 徐友平<sup>2</sup>, 李威<sup>1</sup>, 党杰<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞集团公司/国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 以跨区互联电网为背景, 以阻断电网发生暂态相继失稳、降低发生大停电事故风险、减少系统失稳控制代价为目的, 提出了一种基于多代理技术的电网暂态相继失稳协调阻断方法。该方法首先基于确定性和风险分析方法, 搜索多种工况下电网发生严重故障导致系统功角失稳情况后在相继事件作用下可能发生的暂态相继失稳模式及其事故链。然后, 基于 EEAC 分群理论对控制策略进行搜索, 解决不同失稳模式下的控制策略冲突问题, 利用 EEAC 量化分析工具对不同控制措施进行排序。最后, 以系统总风险最小为目标对预防控制和紧急控制进行协调优化。仿真验证了该方法的可行性。

**关键词:** 跨区互联电网; 暂态相继失稳; 风险评估; 预防控制; 紧急控制; 多代理; 协调

### Research on risk assessment and coordinated blocking of transient successive instability in power grid

CHANG Hai-jun<sup>1</sup>, HOU Yu-qiang<sup>1</sup>, REN Xian-cheng<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, LIU Fu-suo<sup>1</sup>,  
XU You-ping<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, DANG Jie<sup>2</sup>

(1. Nanjing NARI Group Co., Ltd/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;  
2. Central China Power System Dispatching & Control Branch Center, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** Set in cross-regional interconnected power grid, a coordinated control method based on the multi-agent technology is presented, which is used for blocking power grid transient successive instability, reducing the risk of blackouts and control cost. Based on certain and risk analysis method, it firstly searches the possible transient successive instability modes and fault chains under the action of successive events after system instability caused by severe faults. Then it searches control strategy based on EEAC grouping theory and solves the control strategy contradiction problem with different instability modes. On this basis, it utilizes EEAC quantification analytical tool to sort different control measures. Finally, with the objective of minimizing total system risk preventive control strategy and emergency control strategy are coordinated and optimized. The method is verified by simulation.

**Key words:** cross-regional interconnected power grid; transient successive instability; risk assessment; preventive control; emergency control; multi-agent; coordination

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0040-08

## 0 引言

电网跨大区互联在促进能源资源在更大范围内优化配置和取得巨大经济效益的同时也使电网的安全稳定特性更加复杂。譬如电网遭受严重故障后的不平衡功率分配特性、暂态失稳模式及其关联的关键断面、交直流耦合程度在联网前后可能发生较大变化; 原来应对区域电网内严重故障的安控策略可能激发互联电网中其他区域的安全稳定问题。特别是在电网互联过渡初期, 一旦发生连锁故障出现

安控策略不适应甚至安控拒动, 很可能导致电网暂态相继失稳, 严重威胁电网的安全稳定运行。

近年所发生的系统范围的大停电再次表明, 电网失稳甚至崩溃不再是单一故障的结果, 而通常与一系列相继事件联系在一起, 表现为由偶然故障引发相继故障, 在此过程中伴随着保护、安控装置的不正确动作, 导致暂态相继失稳并最终演化为电力系统灾难。因此, 阻断电网发生暂态相继失稳对于降低系统失稳控制代价甚至避免发生大停电事故, 提高电力系统安全稳定运行水平具有重要意义。

然而, 电力系统既是一个集安全和经济并存的多目标系统, 又是一个集预防控制(改变电网结构、调整系统潮流等)、紧急控制(切机、切负荷、直流调制等)及校正控制等多种控制措施于一体的系

**基金项目:** 国家电网公司科技项目(“特大型同步电网严重故障下的主动防御措施研究”、“多区域安控系统协调及在线诊断、辅助决策技术研发应用”)

统。随着社会的发展和资源的重组, 电力系统安全与经济间的优化协调日趋迫切<sup>[1]</sup>, 系统受扰后的控制决策往往受到安全与经济双重制约, 如何兼顾安全与经济双重指标是迫切需要解决的问题。传统基于确定性分析方法获得的结果相对保守, 限制了互联电网输电能力, 某些情况下还可能产生控制负效应。文献[2-5]将概率分析方法引入电力系统, 并考虑了系统各类元件、继电保护和控制装置的动作概率和系统状态的随机性, 结果更加客观; 文献[6-8]将风险评估方法与概率方法结合, 使得分析结果既考虑到了安全性也兼顾了经济性, 迎合了电力市场改革的需求。但上述研究均没有深入探讨如何搜索跨大区互联电网潜在的暂态相继失稳模式并评估其发生的风险; 以及如何在庞大的控制空间和不同控制手段之间寻优, 以最小的控制代价实现暂态相继失稳快速阻断。随着广域测量系统技术的发展和多代理系统技术 (Multi-agent System, MAS) 日趋成熟及在电力系统诸多方面的应用<sup>[9-11]</sup>, 为实现跨区互联电力系统的暂态相继失稳协调阻断控制提供了一种新的途径和方法。

本文综合确定性和风险分析方法, 构建了电网暂态相继失稳模式的搜索模型和暂态相继失稳风险评估模型, 提出了基于多代理技术的、预防控制和紧急控制相协调的阻断技术及实现方案, 给出了阻断相继失稳模式的不同控制措施间的冲突解决方案。

## 1 电力系统的暂态相继失稳

电网发生故障导致系统发生暂态功角失稳后, 若不采取任何措施或无其他相继事件发生情况下, 系统通常表现为单一的失稳模式; 但若在很短时间内系统又相继出现安全稳定自动控制装置动作或误动或拒动或欠动、短路故障冲击或关键元件相继开断事件导致系统出现新的暂态失稳模式, 即系统发生了暂态相继失稳。

研究表明, 常见的可能引发电力系统发生暂态相继失稳的情况主要有:

(1) 电网结构发生变化后原有解决局部暂态稳定问题的安控动作后引发新的相继失稳模式。

(2) 严重交流短路故障导致大电网暂态失稳, 安控欠控或拒动后, 失步解列装置动作导致关键弱交流断面解列后引发电网暂态相继失稳。

(3) 大容量直流闭锁故障后导致电网暂态失稳, 安控欠控或拒动导致失步解列装置动作后, 引发电网暂态相继失稳。

(4) 跨大区电网互联后, 原有依赖局部电网信息动作的失步解列装置误动导致局部电网关键断

面开断, 引发大区电网暂态失稳, 安控欠控或拒动导致失步解列装置动作后, 引发新的大区电网暂态相继失稳。

## 2 暂态相继失稳的风险评估和模式搜索

风险评估是对系统的风险及其相关影响的综合评价。电力系统的风险评估包括静态安全风险评估<sup>[12-13]</sup>、电压稳定风险评估<sup>[14]</sup>、频率稳定风险评估<sup>[15]</sup>、暂态稳定风险评估<sup>[6-7, 16-19]</sup>、动态风险评估<sup>[20]</sup>、连锁故障风险评估<sup>[21-24]</sup>以及控制保护方面的风险评估<sup>[25]</sup>等, 本文重点研究系统遭受大扰动后发生暂态相继失稳的风险评估方法。

### 2.1 风险理论

IEEE 标准 100-1992 将风险定义为对不期望发生的结果的概率和严重性的度量, 通常采用概率和后果的乘积的表达形式<sup>[16]</sup>。电网在故障扰动下的风险可表示为故障概率与其后果的乘积, 针对各种故障场景, 其风险可定义为故障  $i$  的概率  $\lambda_{di}$  与其代价  $C_i$  的乘积之和, 如式 (1)。

$$R = \sum_{i \in N} \lambda_{di} \cdot C_i \quad (1)$$

式中:  $\lambda_{di}$  为故障场景  $i$  发生的概率;  $C_i$  为故障场景  $i$  的代价;  $N$  为故障场景集。当取  $C_i$  为 1 时, 即为概率分析; 当取  $C_i$  为经济代价时则得到风险指标; 当  $\lambda_{di}$  及  $C_i$  均取为 1 时, 即将不安全的大概率场景等同于不安全的小概率事件; 而对于特定的故障场景  $i$ , 这就是确定性分析。

### 2.2 风险决策方法的优势

跨大区互联, 大规模间歇性新能源并网, 冲击性负荷的不断增加, FACTS 柔性控制装置的广泛使用, 使得当今电力系统中不确定性因素日益增多, 给电力系统的安全稳定分析、决策带来极大挑战, 将风险分析决策技术应用于电力系统成为一种趋势。传统的确定性暂态分析方法计算量小, 对数据的要求低, 易于理解和实施, 但忽视了严重故障的低概率特性, 结论相对保守; 而且对暂态失稳后果的代价不加区别, 不适应电力市场化背景下各方面参与者追求最大利益的需要。

概率分析方法反映了问题的随机本质和系统稳定性的整体水平<sup>[14]</sup>, 但不能反映问题的经济代价, 无法为决策提供经济性的量化支持, 难以适应市场环境下经济利益最大化的技术决策准则。

风险分析方法通过其两个要素 (概率和后果) 来兼顾技术与经济的要求。概率反映了不同的运行条件及各种事故的发生可能性, 不同事故的后果通

过其造成的经济损失来反映，将安全稳定性与经济性统一在货币这一量纲上，然后以决策者的风险态度来取舍风险值。以货币为量纲的风险分析决策方法很好地克服了确定性方法和概率方法的缺点，有效地将系统的安全稳定性与经济性统一起来，可以综合考虑各种不确定性因素，直接量化地比较不同参数变化、不同扰动场景以及控制措施对系统安全稳定的影响，进而实现了技术经济一体化的分析与决策。

### 2.3 暂态相继失稳模式搜索

本文建立的暂态相继失稳模式搜索模型主要含确定性搜索层和概率搜索层两个层进行反复搜索，体现了必然性和偶然性的结合，在确定性搜索层模型中除初始故障外，后续连锁事件的条件概率均为1，即发生A事件必然导致B事件的发生。概率搜索层模型在确定性搜索层模型基础上，重点考虑了隐性故障和条件概率不为1的事故链，即发生A事件有可能导致B事件的发生，存在一定的概率。

互联电网发生故障导致系统暂态功角失稳情况下，若由稳定控制装置和继电保护装置可靠正确动作导致的暂态相继失稳即属于确定性事件；而类似安控不足或拒动、相关元件相继开断等隐性故障并最终导致系统暂态相继失稳的情况，因无法预料一般属于不确定性事件。概率搜索层模型仍采用基于故障仿真的搜索思想，和确定性搜索层模型不同的是，除了要确定触发故障的概率外，重要的是根据事先划定的不确定因素发生的统计概率，确定后续路径的搜索方向。具体的搜索流程如图1所示。

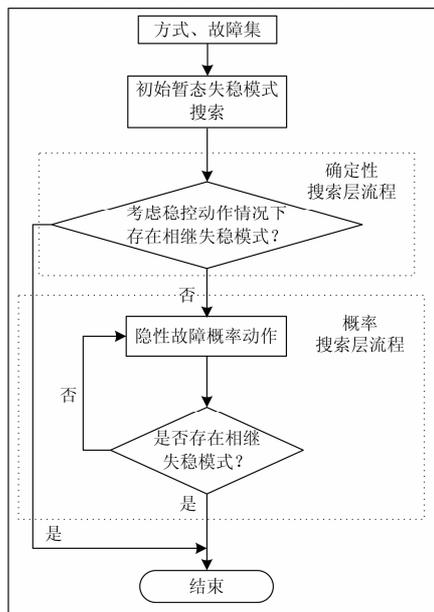


图1 暂态相继失稳搜索模型

Fig. 1 Search model of transient successive instability

1) 该模型首先解析可能导致系统暂态相继失稳的确定性的事件，即条件概率为1的路径。

2) 其次，增加可能导致系统暂态相继失稳发生的隐性故障。按隐性故障发生概率的大小在允许范围内（如概率大于0.6）从大到小追加导致短路故障冲击、线路元件开断、安控拒动等概率动作事件，进而进一步分析是否导致暂态相继失稳事件，若搜索过程中出现新的失稳模式，则结束搜索，记录下暂态相继失稳模式及其事故链。

### 2.4 暂态相继失稳风险计算

#### 1) 暂态相继失稳的风险分析

风险分析需要预估潜在故障所对应的损失，其中包含两方面的困难：一个是预估某特定预想故障场景下发电机或负荷停电所对应的损失。虽然采用分类统计及经验赋值法预估停电损失误差较大，但仍不失为一种工程可行的方法。另一个困难则是致命的，即如何识别预想故障下哪些发电机或负荷会停电，并预测停电将持续多长时间。由于低压电网、保护和恢复控制的模型不完善，风险分析至今无法从理论走向应用。停电损失很好地反映了已发生故障的严重程度，但对假想的故障，失稳后的停电节点和持续时间都无法估计。若用使系统稳定的最小控制代价来反映故障后果，不但避免了估计停电范围和停电时间的困难，也更符合实际情况。由此，可将故障风险定义为：

使系统稳定的最小控制代价与故障发生概率的乘积。

#### 2) 元件动作概率

故障发生概率可来自于历史数据的统计特性或依赖于合理的假定。

### 2.5 风险评估模型

针对某一运行方式下可能发生的暂态相继失稳事故链，其风险可表示为

$$R_{ecn} = \sum_{i=0}^n \lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdots \lambda_n \cdot C_{ecn} \quad (2)$$

式中： $n$  为相继故障级数； $C_{ecn}$  为故障的紧急控制代价，可通过最小的控制代价反映故障后的损失代价。

## 3 暂态相继失稳协调阻断技术

### 3.1 控制原则

暂态相继失稳阻断控制由预防控制、紧急控制和人工紧急调度三个部分组成。人工紧急调度可参考基于广域测量系统和能量管理系统信息的紧急调

控辅助决策信息, 通过人工调度来阻断暂态相继失稳, 在确保调度可用的紧急调控措施处于可控状态基础上, 确认人工紧急调控所需实施时间小于其所针对的安全稳定问题的控制时间要求, 是采取人工紧急调控的可行条件。

当相继时间中间环节不具有可控时间时, 将已配紧急控制措施作为既有模型, 通过优化预防控制和紧急控制来阻断暂态相继失稳。

### 3.2 控制优化模型

基于风险的暂态相继失稳的协调控制方法, 以系统的总风险最小, 即考虑预防控制代价和紧急控制代价的概率加权之和最小为优化原则, 生成暂态相继失稳的阻断控制策略。数学模型为

$$\begin{aligned} \min R &= \min(R_{pcn} + R_{ecn}) \\ \text{s.t.} \quad &g(x) = 0 \\ &h(x) \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $R_{pcn}$  为预防控制代价;  $R_{ecn}$  为紧急控制代价;  $g(x) = 0$  为系统等式约束, 如潮流方程等。  $h(x) \leq \varepsilon$  为系统不等式约束, 包含控制量的容量限制和系统稳定要求, 且后者必须通过系统稳定分析来判断。

### 3.3 控制策略的搜索

#### 3.3.1 控制策略冲突的解决

预防控制和紧急控制都是电力系统中扩大电网稳定域的主要手段。预防控制的实施与故障发生与否无关, 一个预防控制措施会影响所有故障的稳定性<sup>[26]</sup>, 可能在改善某些暂态失稳模式的同时恶化其他失稳模式, 且不同的预防控制措施对不同的暂态失稳模式的控制灵敏度和控制代价不一样, 因此, 在策略搜索中应尽量考虑到以上因素, 制定出合理有效的途径。紧急控制是在故障发生时才会实施, 控制之间一般不会发生冲突, 但在发生暂态相继失稳故障时, 系统将存在多个失稳模式, 某个区域所在机群既可能属于一个失稳模式的领前群, 同时也属于另一个失稳模式的余下群, 则在这个区域搜索的控制策略将对两个失稳模式产生相反的影响, 此时需要注意在此区域的紧急控制措施对不同失稳模式产生的冲突。

为避免控制策略发生冲突, 如图 2 所示, 可在对所有失稳模式对应的临界群属性一样的重叠空间进行搜索, 这样搜索到的控制策略对所有失稳模式都有利。需要指出的是, 在实际运行中, 电网一旦发生严重故障留给系统的可控时间非常短, 而对于有暂态相继失稳风险的故障, 这段时间尤其宝贵, 因此, 选择最优的策略空间进行搜索尤其必要。

$S_i \cap S_j$  与  $A_i \cap A_j$  区域为策略搜索优化空间

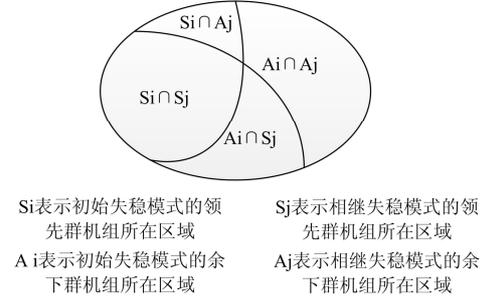


图 2 暂态相继失稳策略搜索空间选择例图

Fig. 2 Case diagram of transient successive instability strategy search space selection

#### 3.3.2 预防控制策略搜索

基于搜索到的暂态相继失稳模式, 识别失稳模式临界群机组之间的关联输电断面, 然后通过有功调度在  $A_i \cap A_j$  区域增加可增有功容量, 或在  $S_i \cap S_j$  区域降低可降有功容量, 同时协调其他对应区域的有功功率来调整关联断面的输电功率, 求得关联断面的预防控制的可调容量, 形成预防控制策略备选空间。

#### 3.3.3 紧急控制策略搜索

紧急控制策略可以通过在  $S_i \cap S_j$  区域内搜索可控的切机量、受入直流回降量、外送直流提升量, 或在  $A_i \cap A_j$  区域内搜索可控的切负荷量、受入直流提升量、外送直流回降量, 然后基于 EEAC 量化分析工具求取不同控制措施的性能比, 即  $W_i = \Delta \eta_i / \Delta C_i$ <sup>[27]</sup>, 其中,  $i$  表示控制措施,  $\eta$  表示暂态稳定裕度<sup>[28]</sup>,  $C$  表示调整不同控制措施的代价, 然后进行性价比灵敏度排序, 形成紧急控制策略备选空间。

### 3.4 控制方案实现

多代理系统是由多个代理组成的一个松散耦合的联盟, 通过各代理间的通信协作可完成超出单个代理能力或知识的任务, 在电力系统诸多方面得到广泛应用。

本文考虑通过多代理技术实现暂态相继失稳预防控制和紧急控制的协调阻断, 并建立含协调代理、失稳模式代理、关联断面代理和控制代理在内的 4 层复合结构。为实现上述功能, 首先针对电网在多种工况下发生极端严重故障的概率及其后果, 深入分析电网可能的暂态相继失稳模式及其事故链, 在电网内设立失稳模式代理, 将实际的切机控制、切负荷控制及直流控制措施作为控制代理, 全网设置一个协调代理, 从而得到基于多代理的暂态相继失稳阻断控制模型如图 3 所示。

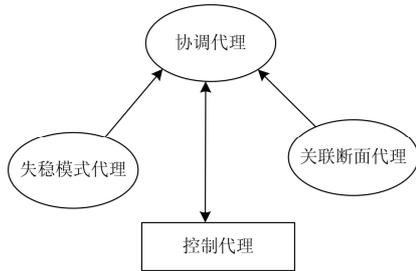


图3 暂态相继失稳多代理控制模型

Fig. 3 Multi-agent control model of transient successive instability mode

图3中，协调代理负责预防控制策略和紧急控制策略的协调优化，并发送控制策略执行命令到控制代理执行；失稳模式代理负责紧急控制策略的搜索及相关性价比灵敏度计算，并上送至协调代理；关联断面代理负责预防控制中关联断面识别及关联断面可调容量分析计算，并上送至协调代理。控制代理负责将当前工况下的可控控制措施及实际的可控控制量信息上传至协调代理，接受其下发的控制指令，并触发相应的控制措施执行，具体阻断流程如图4所示。

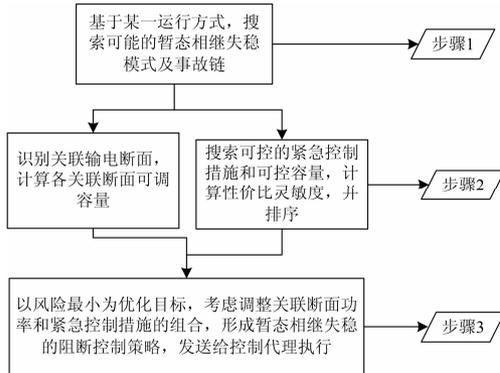


图4 暂态相继失稳阻断流程图

Fig. 4 Flowchart of multi-stage transient successive instability blocking

## 4 算例

### 4.1 暂态相继失稳现象

本文以文献[29]某规划互联电网为例进行研究，如图5。某规划大区电网NT与区域电网A联网典型方式下，AB断面送NT电网5800MW，ED断面送D电网4000MW，C电网内DZ1直流外送3000MW，断面ED线路N-2故障后将导致E电网机组相对于主网机组失稳，见图6。按照原有安控策略采取切E电网机组，随着E电网切机量的增加，系统的暂态失稳模式发生变化，由原来的E电网机组失稳转变为A电网机组相对于NT电网机组失稳

(如表1和图7所示)，即导致暂态相继失稳的发生。

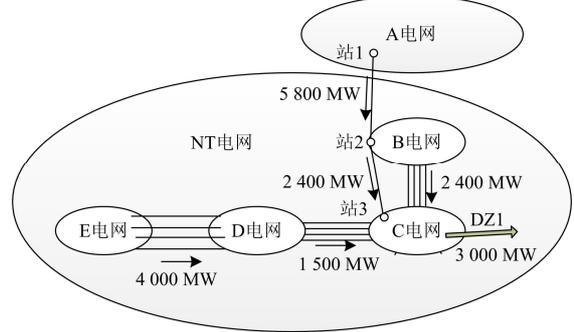


图5 某规划互联电网典型方式潮流图

Fig. 5 Typical flow diagram of planning interconnected power grid

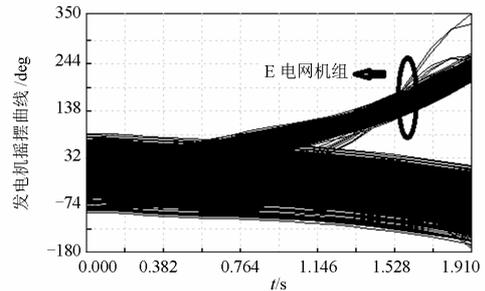


图6 ED断面N-2故障后系统功角响应曲线

Fig. 6 Power angle responding curves when section ED N-2 faults

表1 ED断面N-2故障切电网E机组后系统功角稳定性  
Table 1 Transient angle stability after cutting generators of grid E when section ED N-2 faults

切机措施	切机量/MW	系统安全稳定性
切E电网机组	1 650	E电网机组-主网机组失稳
	2 200	A电网机组-NT电网机组失稳

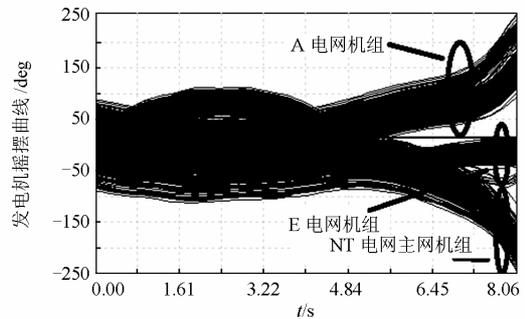


图7 ED断面N-2故障后切E电网2200MW系统失稳模式的变化

Fig. 7 Transient angle stability after cutting 2 200 MW turbine generator output of grid E when section ED N-2 faults

### 4.2 风险评估与协调阻断

很明显, 上述暂态相继失稳是由安控切机(切机量大小与故障前 ED 断面外送功率有关)相继事件导致的, 其中, 电网 B、C、D 处于两个失稳模式共同的余下群, 预防控制策略既可以采取控制 ED 断面外送功率又可以采取控制电网 A 送电网 NT 功率, 紧急控制策略方面需计及导致暂态相继失稳的安控切电网 E 机组外, 可在电网 B、C、D 内搜索控制策略: 回降电网 C 外送直流功率( $n_1$ )、切电网 B 负荷( $n_2$ )、电网 C 负荷( $n_3$ )、电网 D 负荷( $n_4$ ), 以 AB 断面送 5 800 MW, ED 断面送 4 000 MW, 切 D 电网 2 200 MW 机组后采取以上措施进行灵敏度分析, 由表 2 可知, 回降电网 C 外送直流性价比最高, 将其作为本算例的优化候选措施。考虑不同的控制组合方案(如表 3), 详细评估了各种组合控制方案下阻断 ED 断面 N-2 故障后电网 E 机组、电网 A 机组暂态相继失稳故障的控制代价风险(如表 4 和图 8 所示)。

表 2 不同控制措施性价比分析

Table 2 Cost performance analysis of different control measures

初始系统 稳定裕度	采取措施量及 系统裕度	采取措施 的代价	性价比
-75.80	n1: 1 800 MW, -4.83	900 000	0.000 078 9
	n2: 354 MW, -61.83	283 200	0.000 049 3
	n3: 308 MW, -58.38	246 400	0.000 070 7
	n4: 391 MW, -63.05	312 800	0.000 040 7

表 3 ED 断面 N-2 故障后不同控制组合

Table 3 Control combinations when section ED N-2 faults  
MW

控制 方案	AB 断面功率	ED 断面 功率	安控 切机	紧急回降 DZ1 功率
计及安控切机控制, 仅采取预防控制阻断相继失稳				
一	5 800	2 250	0	0
二	5 550	2 700	550	0
三	5 300	3 150	1 100	0
四	5 000	3 700	1 650	0
五	4 700	4 000	2 200	0
计及安控切机控制, 预防控制与紧急控制结合阻断相继失稳				
六	5 800	2 700	550	400
七	5 800	3 150	1 100	800
八	5 800	3 700	1 650	1 300
九	5 800	4 000	2 200	2 000

表 4 ED 断面 N-2 故障风险控制代价

Table 4 Risk control cost when section ED N-2 faults

控制 方案	万元		
	预防控制 风险代价	紧急控制 风险代价	总风险 控制代价
一	350	0	350
二	310	32.34	342.34
三	270	64.68	334.68
四	220	97.02	317.02
五	220	129.36	349.36
六	260	51.94	311.94
七	170	103.88	273.88
八	60	160.72	220.72
九	0	227.36	227.36

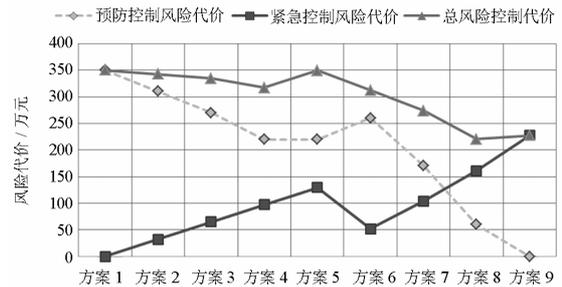


图 8 ED 断面 N-2 故障后风险控制代价

Fig. 8 Risk control cost when section ED N-2 faults

为计算控制代价风险, 将电网 A 送电网 NT 5 800 MW( $P_1^*$ ), ED 断面外送 4 000 MW( $P_2^*$ )设定为运行中的预定目标功率。计算中假设电网公司预防控制单位量损失为 200 元/MWh( $r$ ); 平均单位电能切机损失按 600 元/MWh( $C_{gen,emc}$ ); 直流单位功率回降损失按 500 元/MWh ( $C_{de,emc}$ ), 切负荷损失按 800 元/MWh; ED 断面 N-2 故障概率按 0.1 次/a ( $\lambda_F$ ), 安控正确动作概率按 0.98 ( $\lambda_K$ )。

这样, 电网公司面临的 ED 断面 N-2 故障后的控制代价可表示为

$$R = (P_1^* + P_2^* - P_T - P_C) \cdot r \cdot T_{e,0} + \lambda_F \cdot \lambda_K \cdot (\Delta P_{Ge,emc} \cdot C_{gen,emc} + \Delta P_{De,emc} \cdot C_{de,emc}) \cdot T_{e,0}$$

式中:  $P_T$ 、 $P_C$  分别为电网 A 送电网 NT 的预控功率、ED 断面外送预控功率;  $\Delta P_{Ge,emc}$  为事故 e 导致的切机总量;  $\Delta P_{De,emc}$  为事故 e 导致的回降电网 C 外送直流量;  $T_{e,0}$  为系统恢复时间(按 10 h 计算)。

以上结果表明方案八是优化的控制方案, 同时

该算例也说明仅采用预防控制或仅采用紧急控制都不是最佳的控制方案,因此,基于风险代价最小的暂态相继失稳的控制既需要预防控制与紧急控制的协调,又需要交直流控制措施的协调。

## 5 结语

电网互联使得能源资源实现大范围的有效配置。但随着电网互联建设、大容量直流工程投产,电网的规模不断扩大,电网间的交互影响和联系更加密切,电网本身的结构和特性呈现出新的变化,原有安控策略适应性和安控动作的不确定性,增加了系统发生暂态相继失稳的风险,需引起电网研究和运行人员的注意,研究防御或阻断暂态相继失稳发生的措施,减少或避免系统大面积停电事故的发生。

本文通过基于确定性和风险分析方法,构建了暂态相继失稳模式的搜索模型及其风险评估模型,提出了预防控制和紧急控制相协调的阻断技术,进行了仿真验证。并提出了一种通过基于多代理技术的暂态相继失稳阻断方法,为互联电网的建设和运行提供了技术参考。

## 参考文献

- [1] 薛禹胜, 李威. 关于暂态稳定控制决策优化方法的思考[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 15-21.  
XUE Yu-sheng, LI Wei. A review on the optimization of transient stability controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 15-21.
- [2] ANDERSON P M, TIMKO K A. Probabilistic model of power system disturbances[J]. IEEE Trans on Circuits and System, 1982, 29(11): 789-796.
- [3] ANDERSON P M, BOSE A A. Probabilistic approach to power system stability analysis[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1983, 102(8): 2430- 2439.
- [4] BILLINTON R, GANTY K P R S. Probabilistic assessment of transient stability in a practical multi-machine system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1981, 100(7): 3634-3671.
- [5] 叶圣永, 王晓茹, 刘志刚, 等. 电力系统暂态稳定概率评估方法[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 19-28.  
YE Sheng-yong, WANG Xiao-ru, LIU Zhi-gang, et al. Approach to assess power system transient stability probability[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 19-28.
- [6] 王英, 谈定中, 王小英, 等. 基于风险的暂态稳定性安全评估方法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 20-28.  
WANG Ying, TAN Ding-zhong, WANG Xiao-ying, et al. Application of risk based transient stability and security assessment in power system[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 20-28.
- [7] 王守相, 张伯明, 郭琦. 基于时间裕度的全局电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 51-55.  
WANG Shou-xiang, ZHANG Bo-ming, GUO Qi. Transient security risk assessment of global power system based on time margin[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 51-55.
- [8] VITTAL V, MCCALLEY J D, VAN ACKER V, et al. Transient instability risk assessment[C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, Edmonton, Canada.
- [9] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 45-52.  
LIU Hong-jin, YUAN Bin, DAI Hong-wei, et al. Multi-agent system and its application in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 45-52.
- [10] 陈振宇, 王钢, 李海锋, 等. 基于智能多代理技术的广域网协调保护系统[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 42-45.  
CHEN Zhen-yu, WANG Gang, LI Hai-feng, et al. A MAS-based coordinated protection system for wide area power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 42-45.
- [11] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 基于多代理技术的低频低压减负荷控制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 1-5.  
HOU Yu-qiang, FANG Yong-jie, YANG Wei-dong, et al. A new method of UFLS/UVLS based on multi-agent technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 1-5.
- [12] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.  
LIU Ruo-xi, ZHANG Jian-hua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.
- [13] 吴耀武, 娄素华, 余永泉, 等. 电力市场环境输电线路过载风险评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 198-203.  
WU Yao-wu, LOU Su-hua, YU Yong-quan, et al. Overload risk assessment of power transmission line under power electrical market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 198-203.
- [14] 赵珊珊, 仲悟之, 张东霞, 等. 暂态电压稳定风险评估方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 1-4.  
ZHAO Shan-shan, ZHONG Wu-zhi, ZHANG Dong-xia, et al. A transient voltage instability risk assessment method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 1-4.
- [15] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5):

- 212-220.  
ZHAO Yuan, WU Xiao-ping, XIE Kai-gui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.
- [16] 王伟, 毛安家, 张粒子, 等. 暂态稳定分析中的风险评估方法[J]. 现代电力, 2008, 25(3): 18-23.  
WANG Wei, MAO An-jia, ZHANG Li-zi, et al. Risk assessment approach to transient stability analysis[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(3): 18-23.
- [17] 王伟, 毛安家, 张粒子, 等. 市场条件下电力系统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 68-73.  
WANG Wei, MAO An-jia, ZHANG Li-zi, et al. Risk assessment of power system transient security under market condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 68-73.
- [18] 刘强, 薛禹胜, DONG Zhao-yang, 等. 基于稳定域及条件概率的暂态稳定不确定性分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 1-6.  
LIU Qiang, XUE Yu-sheng, DONG Zhao-yang, et al. Non-deterministic analysis for transient stability based on transient stability domain and conditional probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 1-6.
- [19] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.  
SONG Xiao-zhe, WANG Zhen, GAN De-qiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [20] 赵珊珊, 周子冠, 张东霞, 等. 大区互联电网动态稳定风险评估指标及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 68-72.  
ZHAO Shan-shan, ZHOU Zi-guan, ZHANG Dong-xia, et al. Risk assessment index of dynamic stability for large-scale interconnected grids and its application[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 68-72.
- [21] 宋毅, 王成山. 一种电力系统连锁故障的概率风险评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 27-33.  
SONG Yi, WANG Cheng-shan. A probabilistic risk assessment method for cascading failure of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 27-33.
- [22] 张硕, 刘永民, 梅小丽, 等. 基于实时运行条件的电力系统连锁故障风险性评估[J]. 华中电力, 2011, 24(2): 40-44.  
ZHANG Shuo, LIU Yong-min, MEI Xiao-li, et al. Risk assessment of cascading failures basing on operating conditions[J]. Central China Electric Power, 2011, 24(2): 40-44.
- [23] 易俊, 周孝信. 基于连锁故障搜索模型的降低电网发生连锁故障风险的方法[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 19-22.  
YI Jun, ZHOU Xiao-xin. Analysis on method of decreasing the risk of cascading failures in power systems based on cascading failure searching model[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 19-22.
- [24] 李立, 鲁宗相, 周双喜. 典型 FACTS 设备对连锁故障风险影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 1-7.  
LI Li, LU Zong-xiang, ZHOU Shuang-xi. Research on the effect of typical FACTS devices on cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 1-7.
- [25] 戴志辉, 王增平, 焦彦军. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.  
DAI Zhi-hui, WANG Zeng-ping, JIAO Yan-jun. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [26] 李威, 薛禹胜, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(二) 不同失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 7-10.  
LI Wei, XUE Yu-sheng, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability part two for cases with different unstable modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 7-10.
- [27] 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 Yong-hong, XUE Yu-sheng. Optimal algorithm for regional emergency control[J]. Electric Power, 2000, 33(1): 44-48.
- [28] 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.
- [29] 任先成, 常海军, 李威. 电网互联后安控适应性及策略重构研究[C] // 中国电机工程学会年会, 2012.  
REN Xian-cheng, CHANG Hai-jun, LI Wei. Study on the stability control strategy adaptability and remaking after the interconnection of power grids[C] // CSEE, 2012.

收稿日期: 2013-08-14; 修回日期: 2013-10-28

作者简介:

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

侯玉强(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电网安全稳定分析与控制;

任先成(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大电网安全稳定分析与控制。