

DOI: 10.7667/PSPC161895

# 多种稳定问题矩阵式量化指标及交直流协调控制策略

张红丽<sup>1</sup>, 刘福锁<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>, 牛拴保<sup>2</sup>, 柯贤波<sup>2</sup>

(1. 南瑞集团公司, 江苏 南京 211106; 2. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 大电网严重故障下可能出现功角、电压和频率等多种稳定问题。研究并量化了故障严重程度等相关因素对多种稳定问题交互演化的影响。提出了基于暂态动能改善和控制灵敏度的多稳定问题矩阵式量化评价指标与方法, 充分计及单一稳定和综合稳定控制效果、控制负效应和超调控制等。基于该指标提出了多种稳定问题并存条件下交直流紧急控制策略, 提升了紧急控制算法对于处理复杂稳定情况的适应性。基于实际电网的算例验证了所提紧急控制策略的有效性。

**关键词:** 多种稳定问题; 交互演化途径; 矩阵式量化评价指标; 负效应; 交直流紧急控制策略

## Matrix quantitative index of multiple stability problems and AC/DC coordinated control strategy

ZHANG Hongli<sup>1</sup>, LIU Fusuo<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, NIU Shuanbao<sup>2</sup>, KE Xianbo<sup>2</sup>

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. State Grid Northwest China Power System Dispatching & Control Branch Center, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** Multiple stability problems in angle, voltage and frequency may occur under severe faults in large power grids. In this paper, the impacts of the relevant factors such as the fault severity on the interactive evolvement of multiple stability problems are studied and quantified. In addition, a matrix quantitative evaluation index and a corresponding method of multiple stability problems based on the improvement of transient kinetic energy and control sensitivity are proposed, which fully take the effects of single stability and comprehensive stability control, negative effects of control and overshoot control and so on into account. Based on the index, an AC/DC emergency control strategy under the circumstance of the coexistence of multiple stability problems is proposed to enhance the applicability of emergency control algorithms to deal with complex stable situations. Simulation results based on the actual electric network demonstrate the effectiveness of the proposed AC/DC emergency control strategy.

**Key words:** multiple stability problems; interactive evolvement approach; matrix quantitative evaluation index; negative effect; AC/DC emergency control strategy

## 0 引言

目前, 大区电网互联、特高压交直流输电和远距离大容量资源能源的电网结构使得电网特性发生极大改变<sup>[1-4]</sup>, 为了把握主导因素, 稳定问题的研究一般将功角、电压和频率问题孤立起来, 而缺乏统一的分析方法。目前电网的稳控措施大多数也是针对单个稳定问题<sup>[5-7]</sup>, 如功角稳定采用切机和甩负荷,

电压稳定采用低压减载, 频率稳定问题下则采用低频减载或高周切机等。

系统电压、功角和频率等稳定性, 反映的是电力系统稳定性的一个侧面, 它们之间并没有明确的界线, 近年来已有文献对功角稳定和电压稳定的相关性进行了研究, 并提出了不同主导稳定问题的判别方法<sup>[8-9]</sup>。文献[10]从系统的恒电势模型出发, 分析了电压稳定和功角稳定的关联特性, 并通过各发电机和中心负荷的电气距离判别系统稳定的主导因素。文献[11]提出了一种基于有功功率/功角和无功功率/电压幅值的主导失稳模式识别方法, 但该方法无法对系统稳定性判别, 且该指标在复杂大电网中存在计算求解困难。文献[12]考虑了局部电压失稳

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“大电网严重故障下多稳定形态交互影响分析及控制技术研究”; 国网公司西北分部科技项目“多电源类型特高压送端电网源协调技术深化研究”

导致功角失稳的情况，基于响应信息监测系统功角和电压稳定相关变量变化并制定相应紧急控制方案，但未考虑功角或电压稳定问题对频率安全的影响，大容量直流闭锁和机组跳闸或突增大量负荷等情况下系统有功功率不平衡，极易引发第三道防线动作。

随着交直流互联电网耦合越来越紧密，某些系统动态场景下若仍孤立地去研究功角、电压和频率问题，难以准确把握系统特性和形成准确可靠的控制策略，且无法有效识别或判断一类稳定问题施加的控制措施是否会对另一类稳定问题引发负效应。文献[13]采取直流功率调制与切负荷控制措施解决直流故障后引发的华北-华中功角问题，但当河南电网无功供需为主要问题引发电压失稳时，随着系统负荷释放，系统主导稳定问题将不再为功角稳定问题。文献[14]突破第三道防线中低频减载和低压减载限制，提出将电压稳定和频率稳定协调控制的设想，优化切负荷位置和切负荷量，但未针对实际工程提出具体实施途径。文献[15]分析了交直流大扰动耦合效应较强时直流有功无功动态非线性变化恶化交流系统稳定影响，指出利用直流调制抑制大区间低频振荡的可能。

因此，本文针对实际大电网仿真中严重故障下可能出现的功角、电压和频率等多种稳定问题现象，分析多种稳定问题演化的因素及机理，提出基于暂态动能改善和稳定裕度灵敏度的多稳定问题矩阵式量化评价指标，研究了协调多个潜在失稳问题的紧急控制模型和算法，以期为提升紧急控制算法对于复杂失稳问题的适应性提供相关理论和技术基础。

## 1 多种稳定问题交互演化的影响因素

### 1.1 多种稳定问题共存的现象

交直流混联电网不同结构具有相对应的主导失稳问题，导致电网发生多种形式稳定问题的可能有运行方式不合理、故障后群内机组不同调、负荷模型特性、保护误动拒动、安控装置误动拒动和二、三道防线不适应等，实际上一个完整的功角、频率或电压稳定问题可能涉及上述多个因素。

以 2015 年度冬季三华联网数据为例说明稳定问题共存的现象，其拓扑结构如图 1 所示，负荷为 60% 恒阻抗+40%感应电动机模型。四川内部南充—黄岩线路 0 s 发生 N-2 故障；内江—洪沟线路 0.1 s 相继发生三相短路故障，0.2 s 切除内洪双回，不考虑二、三道防线动作。故障后四川机组首先加速，激发了川渝—华中主网—华北机组的功角摇摆模式，川渝作为非同期群与华中机组相对振荡、华中机组作为

整体与华北电网相对振荡，是电网的两个主导振荡模式。

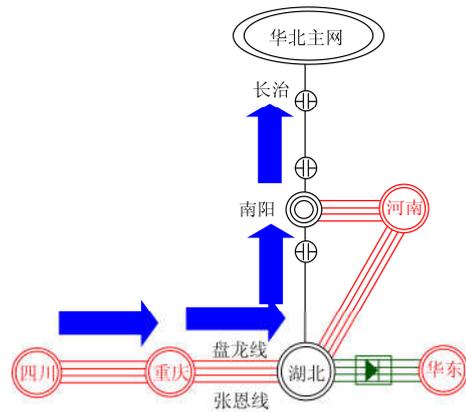


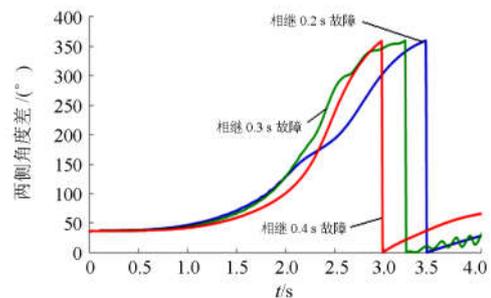
图 1 三华电网拓扑结构

Fig. 1 Schematic diagram of San-Hua power grid

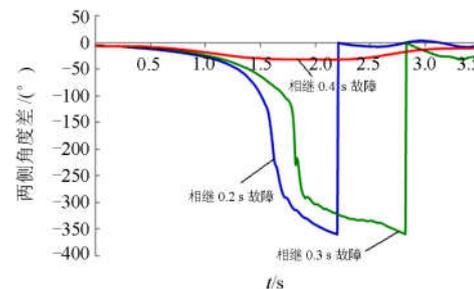
### 1.2 故障严重程度对多种稳定问题的影响

比对南充—黄岩 N-2 与内江—洪沟 N-2 相继故障时间间隔对稳定问题的影响，分别比对相继 10 周波、相继 15 周波和相对 20 周波故障后系统不同的功角、电压和频率演化特性。

由图 2 可知，相继故障间隔时间较长时，系统主要表现为华中—华北机组振荡模式，临界群华中机组同调，为纯功角稳定问题；相继故障间隔时间较短时，系统首先表现为川渝相对华中机组失稳，后续引发华北—华中的失稳模式，且川渝机群内不同调，四川相对重庆机组失稳。



(a) 长南线两侧角度差



(b) 张恩线两侧角度差

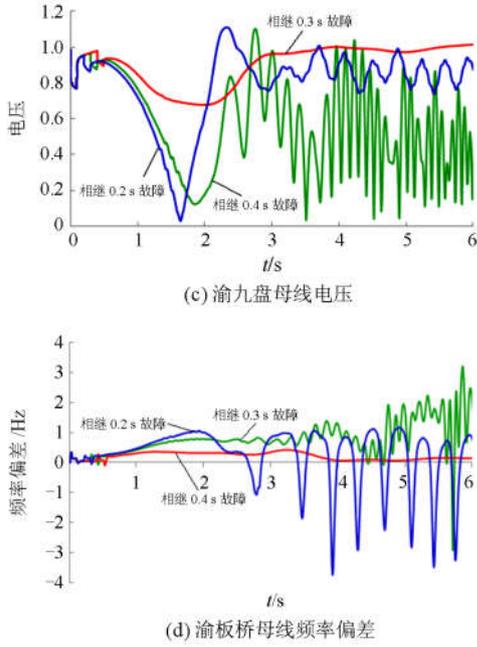


图 2 不同间隔时间下暂态响应

Fig. 2 Transient response of different fault interval time

通过对比相继故障间隔 0.2 s 与 0.3 s 的功角和电压响应曲线可知, 相继 0.2 s 故障后, 川渝机组距离川渝惯量中心较近, 积累的加速能量使得渝鄂断面振荡周期较短, 振荡中心 2.2 s 出现, 比相继 0.3 s 故障提早 0.6 s 达到, 电压回摆幅值较高(1.12 p.u.), 在后续电压下降过程中机组电磁功率下降导致后续电压失稳。上述功角、频率和电压随四川故障间隔时间的交互演化特征可用图 3 表示。

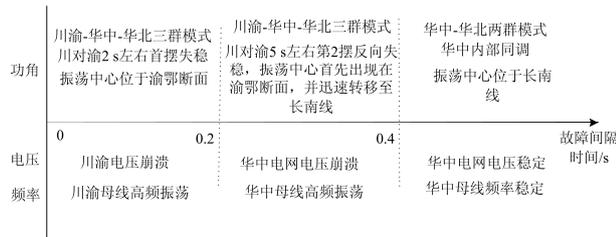


图 3 不同故障间隔时间下稳定问题演化

Fig. 3 Stability evolution of different fault interval time

## 2 多种稳定问题矩阵式量化评价指标

由上述不同因素影响多种稳定问题交互演化的规律可知, 在特定运行工况及影响因素下存在某一主导稳定问题。现有文献及工程已对单一稳定问题提出量化评价指标, 文献[16]提出了基于暂态动能改善的功角稳定问题量化指标。

$$L_{\delta} = \sum_{i \in S} |\sigma_i| \times (E_i - E'_i) + \sum_{i \in A} |\sigma_i| \times (E_i - E'_i) \quad (1)$$

式中:  $\sigma_i$  为机组  $i$  的参与因子;  $E_i$  为无控制措施下系统 DSP 处对应的绝对暂态动能;  $E'_i$  为控制措施施加后原 DSP 处对应的绝对暂态动能;  $S$  为临界群机组集;  $A$  为余下群机组集。

文献[17]提出了适用于在线电压和频率的紧急控制量化指标。

$$L_V = \sum_{j=1}^{B_v} [(1 - \eta_{v,j}) S_{Q,nj}] \quad (2)$$

$$L_f = \sum_{t=1}^{B_f} \left[ (1 - \eta_{f,t}) \left( 1 - \frac{|z_{g,t}|}{|z_{g,t \max}|} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $B_v$  为暂态电压安全稳定薄弱节点数;  $\eta_{v,j}$  为第  $j$  个暂态电压安全稳定薄弱节点的暂态电压安全稳定裕度;  $S_{Q,nj}$  为当前运行状态下控制措施对第  $j$  个暂态电压薄弱节点电压的无功电压灵敏度;  $B_f$  为暂态频率跌落安全薄弱节点数;  $\eta_{f,t}$  为第  $t$  个暂态频率跌落安全薄弱节点的暂态频率跌落安全裕度;  $z_{g,t}$  为控制措施与第  $t$  个暂态频率跌落安全薄弱节点间的电气距离;  $z_{g,nt \max}$  为控制措施与第  $t$  个暂态频率跌落安全薄弱节点间的电气距离最大值;

考虑不同控制措施对改善暂态频率薄弱节点的灵敏度不同, 定义

$$L_f = \sum_{t=1}^{B_f} \left[ (1 - \eta_{f,t}) \left( \frac{1}{|z_{g,t}|} \right) S_{p,t} \right] \quad (4)$$

式中,  $S_{p,t}$  为当前运行状态下控制措施对第  $t$  个暂态频率薄弱节点的频率改善灵敏度。

由于严重故障后系统存在的稳定问题各不相同, 严重程度也不同, 而 EEAC 中功角稳定裕度  $\eta_{\delta}$ 、电压稳定裕度  $\eta_V$  和频率稳定裕度  $\eta_f$  是基于同一量级的稳定性量化衡量, 分别考虑了系统等值单机无穷大系统故障后加速能量、暂态电压稳定、暂态电压跌落、暂态频率偏移可接受程度等, 能够表征故障后系统运行点离各自单一稳定边界的距离, 因此, 定义各稳定问题权重系数为

$$\lambda_{\delta} = \frac{1 - \eta_{\delta}}{3 - (\eta_{\delta} + \eta_V + \eta_f)} \quad (5)$$

$$\lambda_V = \frac{1 - \eta_V}{3 - (\eta_{\delta} + \eta_V + \eta_f)} \quad (6)$$

$$\lambda_f = \frac{1 - \eta_f}{3 - (\eta_{\delta} + \eta_V + \eta_f)} \quad (7)$$

式中,  $-100\% \leq \eta_\delta, \eta_V, \eta_f \leq 100\%$ , 且由于所研究系统存在一种以上的稳定问题, 故  $\eta_\delta, \eta_V, \eta_f$  不同时为 100%。

定义多种稳定问题  $n \times 3$  矩阵式量化评价指标为

$$\begin{bmatrix} L^1 \\ L^2 \\ \vdots \\ L^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_\delta^1 & L_V^1 & L_f^1 \\ L_\delta^2 & L_V^2 & L_f^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L_\delta^n & L_V^n & L_f^n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_\delta \\ \lambda_V \\ \lambda_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $1 \sim n$  为各控制措施类型; 而等式右边依次为不同控制措施对解决功角稳定问题、电压稳定问题和频率稳定问题的改善效果, 且将  $L_\delta^1, L_\delta^2, \dots, L_\delta^n$  定义为自身与  $L_\delta^1 + L_\delta^2 + \dots + L_\delta^n$  的比值, 电压及频率量化指标同理进行加权统一控制, 使得控制措施对于功角、电压和频率的控制指标具有统一数量级的横向比较, 同时使得不同类型控制措施对于同一稳定问题控制效果能够纵向比较。

### 2.1 指标对不同稳定问题的有效性识别

由多种稳定问题对控制效果有效性可知, 如果系统仅存在单一稳定问题, 如功角稳定问题, 则系统电压稳定裕度  $\eta_V$  和频率稳定裕度  $\eta_f$  均为 100%, 则式(8)仅为单一功角稳定问题量化评价指标, 为  $n \times 1$  维矩阵。

为了进行各控制措施有效性识别, 对于单类控制措施而言, 假设当控制措施量  $\Delta P$  较小时, 系统各稳定问题的稳定裕度的变化量  $\Delta \eta$  或多种稳定问题改善指标  $\Delta L$  的变化近似可用如下线性关系描述。

$$\Delta \eta = J \Delta P \quad (9)$$

$$\Delta L = J' \Delta P \quad (10)$$

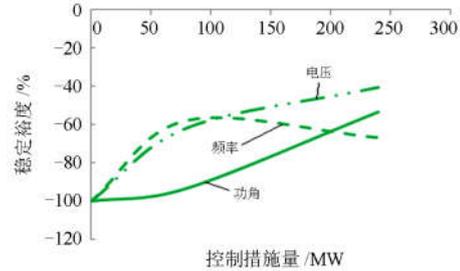
式中,  $J' = KJ$ , 即多种稳定问题量化指标反映不同类型控制措施施加后系统各稳定问题改善效果,  $J$  为控制措施量的变化对各单一问题的稳定裕度影响因子矩阵。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \eta_\delta}{\partial P} \\ \frac{\partial \eta_V}{\partial P} \\ \frac{\partial \eta_f}{\partial P} \end{bmatrix}$$

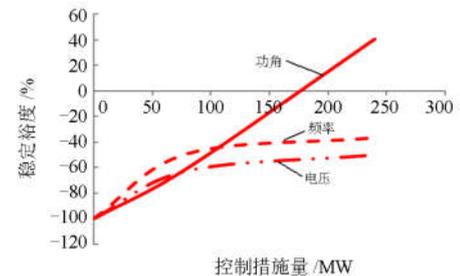
$$\Delta \eta = \begin{bmatrix} \Delta \eta_\delta \\ \Delta \eta_V \\ \Delta \eta_f \end{bmatrix}$$

$$\Delta L = \begin{bmatrix} \Delta L_\delta \\ \Delta L_V \\ \Delta L_f \end{bmatrix}$$

以图 4 系统各稳定裕度随控制措施量增加而变化的趋势来分析控制措施有效性。



(a) 影响因子矩阵负项



(b) 影响因子矩阵零项

图 4 不同控制措施量下系统稳定裕度

Fig. 4 System stability margin under different quantity of control measures

由图 4(a)可知, 单类控制措施施加后系统功角稳定裕度和电压稳定裕度逐步提高, 且施加较小控制量后系统电压和频率稳定裕度提升速度大于功角稳定裕度变化, 一般为故障后引发功角、电压和频率稳定问题共存, 电压和频率稳定伴随主导功角稳定问题的改善而快速恢复, 但控制对频率产生负效应。因此, 进行多种稳定问题控制措施有效性识别时, 不仅要关注式(8)稳定控制对多种稳定问题总体控制效果, 还要关注控制措施量的变化对各单一问题的稳定裕度影响因子矩阵  $J$  各项的符号。

由图 4(b)可知, 单类控制措施施加后系统功角稳定裕度大幅提升, 直到达到系统功角稳定, 但系统电压和频率稳定裕度经历微小提升后  $\frac{\partial \eta_V}{\partial P}$  和  $\frac{\partial \eta_f}{\partial P}$  接近 0, 即单类控制措施仅对局部稳定问题有效, 而不能有效提高共存其余稳定问题的稳定裕度, 控制局部有效性。因此, 在进行多种稳定问题控制措施有效性识别时, 仍要关注控制措施量的变

化对各单一问题的稳定裕度影响因子矩阵  $J$  各项的大小。

## 2.2 指标优化排序方法

通过上述分析可知, 对于存在  $n$  类多种稳定问题矩阵式量化评价指标的, 需要关注的变量为  $L^n$ 、 $L_s^n$ 、 $L_v^n$ 、 $L_f^n$ 、 $J'$  的大小和符号。排序原则如下:

1) 去除单一指标为负、加权指标为负且影响因子矩阵存在负项的控制类型。

2) 优先选择单一指标与加权指标均较大的控制类型。

3) 单一指标或影响因子矩阵局部项较大的相互组合类型。

4) 确定类型后对不同地点的控制效果排序。

需要指出的是, 如果系统仅存在对局部稳定问题有效, 而对其余稳定问题局部负效应的控制类型, 需要根据影响因子矩阵中各项的变化规律判断是否采取单一控制类型或组合控制类型, 而不至于剔除负效应的控制措施后系统无解。

## 2.3 指标对超调现象的动态评估

以 1.1 节华中电网算例采取直流调制措施解决多种稳定问题共存为例, 说明指标对控制超调现象的动态评估。四川内部相继  $N-2$  故障, 分别提升四川直流 2000 MW、4300 MW、5800 MW, 系统功角及电压响应曲线如图 5 所示。

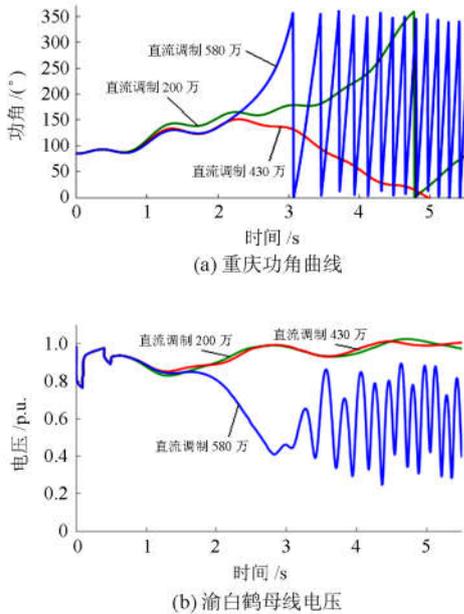


图 5 不同直流调制量下暂态响应

Fig. 5 Transient response of different DC modulation quantity

采取直流紧急功率调制措施时要兼顾电网内电压和频率问题, 若直流功率提升量过多, 容易造成

系统低频问题, 同时直流换流站从交流系统吸收的无功增大, 恶化系统电压稳定性, 如图 5(b)。随着四川提升直流功率的增加, 2 s 内川渝发电机功角回摆幅度增加, 但直流调制量达 580 万 kWh, 系统电压崩溃, 使得川渝负荷释放而不利于功角稳定, 造成系统功角失稳, 如图 5(a), 即出现控制措施超调现象, 通过系统多稳定量化指标衡量如图 6 所示。

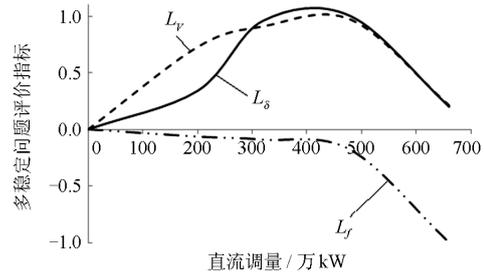


图 6 不同直流调制量下多稳定量化指标

Fig. 6 Multi-stability quantitative index of different DC modulation quantity

由图 6 可知, 随着措施量施加, 临界群机组暂态动能、薄弱节点电压稳定改善效果越来越明显, 反映在多种稳定问题量化指标, 其值越来越大, 直达到某一控制措施量临界值时,  $L$  值达到最大, 即直流调制量饱和, 随后控制措施量化指标急剧下降, 与系统功角、电压暂态响应一致。

## 3 多种稳定问题紧急控制数学模型

多种稳定问题紧急控制本质上可归结为如下—类高维非线性整数规划问题。

$$\min J = \frac{c^T u}{\lambda_s L_s + \lambda_v L_v + \lambda_f L_f} \quad (11)$$

$$\text{s.t. } f(x, u) > 0 \quad (12)$$

$$g(x, u) = 0 \quad (13)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (14)$$

式(11)中:  $J$  为控制费用与稳定性综合改善量化指标之商最小的目标函数;  $c$  为控制代价向量;  $u$  为紧急控制向量;  $L_s$ 、 $L_v$  和  $L_f$  分别为多稳定问题指标向量。式(12)为系统多种稳定问题暂态稳定约束,  $x$  为系统状态变量。式(13)为系统运行等式约束。式(14)为紧急控制设备容量限制。

式(12)的系统多种稳定问题暂态稳定约束  $f$  代表了一种稳定性测度, 表征了系统运行点到稳定域各个方向边界的距离, 并且具有“只要运行点在一个方向上越界, 系统稳定性就不满足”的性质, 因此, 为了便于处理该约束, 将其分解为 3 个含功角、

电压和频率的子约束, 每个子约束的函数值  $f_k$  代表某一特定方向上系统运行点到稳定域边界的距离。如式(15)所示。

$$\text{s.t. } f_k(x, u) > 0 \quad k=1 \sim 3 \quad (15)$$

上述约束转化是基于工程可行性假设作出的近似转化。通过上述约束转化, 一方面将多稳定量化矩阵式指标反映至紧急控制效果上, 使得对总体或单一稳定问题的表述更为直观、明确; 另一方面, 有助于避免以往仅基于单一稳定问题的紧急控制算法在策略搜索过程中出现其他控制负效应或超调而导致的算法振荡和低效等问题。

#### 4 考虑多稳定问题的交直流协调控制策略

现有交直流协调控制技术搜索方法是基于功角-电压-频率递进穷举式算法, 即首先执行功角稳定性判别及控制, 满足功角稳定前提下进行电压稳定性判别及控制, 最后进行频率稳定控制。控制目标仍然是单一稳定控制, 搜索到的结果为单一稳定问题局部解+另一单一稳定局部解等。这种控制策略搜索算法对大多数主导稳定问题或单一稳定问题适应性较强, 而对复杂多种稳定问题共存工况, 会出现控制负效应, 如执行功角控制恶化电压、低频, 使得进入电压和频率稳定控制时效果不佳, 反而需要匹配更多其他控制量。图 7 所示为考虑多稳定问题的交直流协调策略。

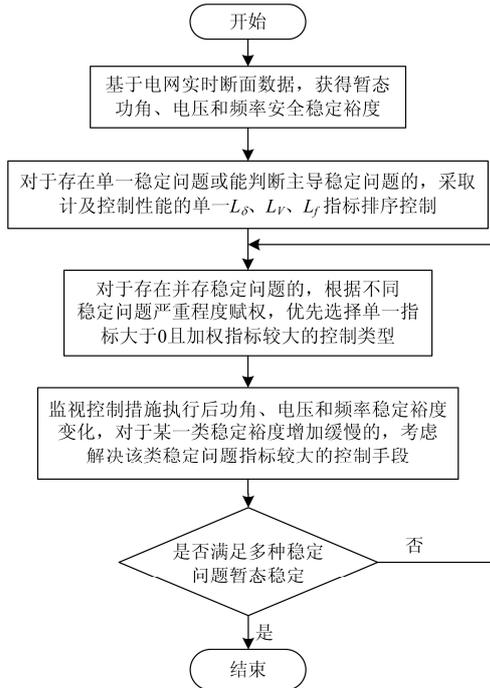


图 7 交直流协调控制流程图

Fig. 7 Flow chart of AC/DC coordination control

## 5 算例分析

### 5.1 算例 1

对演化过程中存在主导稳定问题的华东电网算例进行单一控制策略验证。选取浙南电网 2016 年夏季高峰方式, 如图 8 所示, 直流满送运行, 浙南受电 43%。金华—丹溪  $N-2$  故障相继闭锁宾金直流、灵绍直流, 故障后兰溪和龙游电厂相对主网功角失稳, 浙南电压降至 0.6 p.u. 华东主网频率低于 49 Hz。

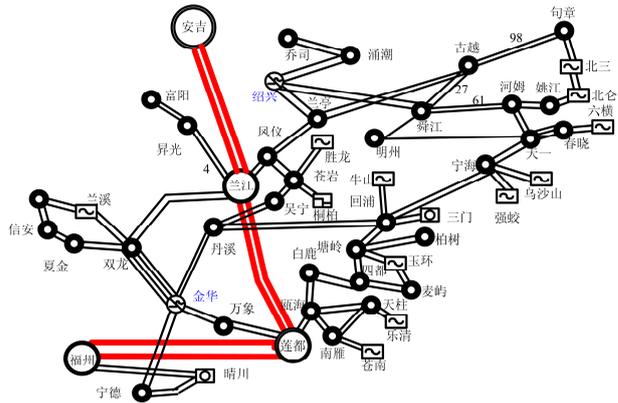


图 8 浙南电网示意图

Fig. 8 Structure of Zhe-Nan power system

控制类型 1: 切除兰溪和龙游机组共 195 万 kW; 控制类型 2: 定点切除浙南 195 万 kW 负荷; 控制类型 3: 提升剩余 5 回直流共 195 万 kW。

分别以上述 3 种单一控制类型进行多稳定量化指标排序及搜索路径, 并与实际控制效果对比, 假定直流控制代价为 0.1 万元/MW, 切火电机组代价为 0.2 万元/MW, 切负荷代价为 0.25 万元/MW。表 1 所示为不同控制类型的矩阵式评价指标及控制代价。

表 1 不同控制类型评价指标

Table 1 Evaluation index of different types of control

$n$	$\lambda_\delta L_\delta^n$	$\lambda_V L_V^n$	$\lambda_f L_f^n$	$L^n$	$J/e^{-2}$
1	0.11	0.06	-0.08	0.09	43.33
2	0.11	0.14	0.19	0.44	11.08
3	0.11	0.13	0.22	0.46	4.24

由表 1 可知, 虽然故障后系统表现为局部机组失步, 但采取切机控制措施恶化华东电网频率稳定, 而采取直流调制措施对多种稳定问题综合量化指标较优, 且控制代价最小, 控制后系统电压和频率恢复曲线如图 9 所示, 可知调制直流措施有效, 未触发第三道防线装置动作。

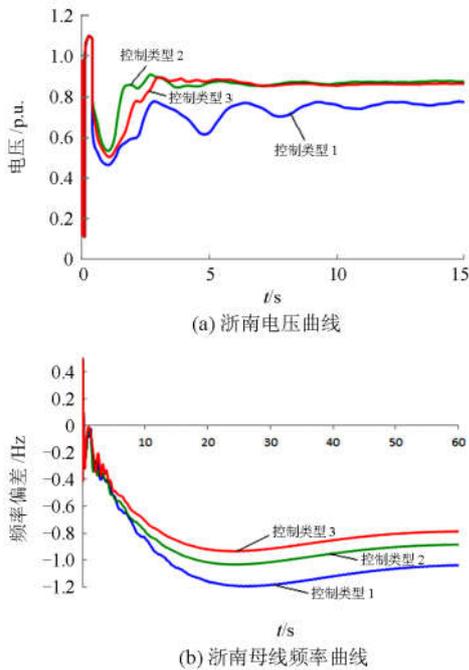


图 9 不同控制类型下暂态响应

Fig. 9 Transient response of different types of control

按照传统失稳主导因素判断为浙南电网大受电方式, 机组开机较少, 严重故障下电压支撑不足的问题, 以文献[10]现有在线紧急控制策略搜索优先选取调制直流控制措施, 与本文紧急控制策略一致。所不同的是, 由于系统同时存在功角稳定问题, 在进行原有在线控制策略搜索前仍需进行功角稳定控制局部解搜索, 即仍会搜索到切机控制措施, 在跳出功角稳定局部解进入电压稳定判断时才搜索到最优控制解, 增加了迭代判据时间。

## 5.2 算例 2

对演化过程中存在并存稳定问题的华中电网算例进行多稳定问题协调控制策略验证。2015 年三华电网示意图如图 1 所示, 长南线南送 580 万, 发生洪沟—板桥 N-2 故障, 系统暂态失稳, 单一稳定问题裕度均为-100%,  $\lambda_\delta$ 、 $\lambda_r$ 、 $\lambda_f$  均为 1/3。

控制类型 1: 切除四川向家坝 800 MW 机组;  
控制类型 2: 提升四川直流、回降三峡直流 400 MW;  
控制类型 3: 切除湖北负荷 800 MW。

对于功角稳定控制, 无安控措施下系统 DSP 点出现时刻为 0.55 s, 选择临界群中参与因子大于 0.5 的临界群机组川新平、川锦屏、川官地、川二滩和余下群渝二郎、渝合川、渝珞璜机组作为敏感机组, 计算候选措施对其暂态动能灵敏度; 对于电压稳定控制, 选取电压稳定裕度为-100%的川黄岩, 渝万县为电压薄弱节点, 考察摄动后对最低点电压改善;

对于频率稳定控制, 选取频率稳定裕度为-100%的川亭子口, 川巴中为频率薄弱节点, 计算候选控制措施距离薄弱节点电气距离, 做加权处理, 不同控制措施对功角、电压和频率的灵敏度如表 2 所示。

表 2 候选措施对多种稳定问题灵敏度

Table 2 Sensitivity of candidate measures to kinds of stability problems

控制类型	暂态动能改善	电压灵敏度	平均电气距离	频率灵敏度
1	0.58	0.45	0.26	0.34
2	0.31	0.41	0.24	0.62
3	0.11	0.15	8.30	0.05

上述暂态动能改善指标计及不同控制措施对临界群、余下群参与因子较大机组改善效果; 电压灵敏度指标考虑对四川薄弱节点暂态电压改善效果, 由于是摄动灵敏度, 能够及时筛选出负效应的措施; 频率灵敏度指标在原有在线频率指标基础上加入频率改善因子, 优先选择距频率薄弱节点较近的控制措施。对表 2 中多种稳定问题矩阵式指标考虑权重系数后进行加权, 并代入式(11)如表 3 所示。

表 3 不同控制类型评价指标

Table 3 Evaluation index of different types of control

$n$	$\lambda_\delta L_\delta^n$	$\lambda_r L_r^n$	$\lambda_f L_f^n$	$L^n$	$J/e^{-2}$
1	0.19	0.15	0.11	0.45	0.36
2	0.10	0.14	0.21	0.45	0.18
3	0.04	0.05	0.02	0.11	1.82

注:  $e^{-2}$  为  $10^{-2}$ 。

由表 4 可知, 第一次迭代选取对多种稳定问题

表 4 暂态稳定最优控制策略

Table 4 Optimal control strategy of transient stability

迭代次数	安控类型	控制量/MW	$\eta_\delta$ /%	$\eta_r$ /%	$\eta_f$ /%
1	复奉	提升 2×320	-73.6	-100	100
	锦苏	提升 2×360			
	龙政	回降 2×340			
	宜华	回降 2×340			
2	复奉	提升 2×320	19.8	-15.9	100
	锦苏	提升 2×360			
	龙政	回降 2×800			
	宜华	回降 2×800			
	向家坝	切除 3×800			
3	复奉	提升 2×320	79.9	0.18	100
	锦苏	提升 2×360			
	龙政	回降 2×950			
	宜华	回降 2×950			
	向家坝	切除 3×800			

均有效且控制代价最小的调制直流控制措施, 进入第二次迭代时发现存在如图 4(b)所示直流调制对功角稳定问题影响因子矩阵值较小情况, 因此采用切机控制与调制直流控制措施相配合, 增加对功角稳定和电压稳定的综合控制效果, 经过三次迭代满足系统多种稳定问题要求, 各稳定裕度均大于 0。

研究发现, 若以现有功角-电压-频率稳定递进式紧急控制策略方法进行求解, 首先判断系统功角失稳, 在满足式(12)直流调制约束范围内仍无法使得功角稳定, 继续搜索切机控制策略, 切除向家坝、瀑布沟约5200 MW 机组后系统功角稳定, 但进入频率安全稳定控制搜索时, 仍需匹配大量切负荷量, 而使得控制代价远大于本文搜索控制策略。因此, 在进行紧急控制策略搜索时, 若只关注单一稳定问题或主导稳定问题, 会错过对多种稳定问题均有效的单一或组合控制策略, 导致搜索时间长且控制代价大等。

## 6 结论

1) 故障严重程度可能引发功角的不同失稳模式, 而对电压和频率的演化过程造成影响, 同时机组内的非同调特性出现的时刻与电压崩溃和频率振荡的时刻重合。

2) 负荷模型和直流控制方式等影响不同稳定问题的相互演化, 而使得传统针对单一稳定问题的控制策略出现不适应情况。

3) 所提多种稳定问题矩阵式量化指标不仅是对控制效果的加权, 同时关注矩阵中单一变量动态变化效果, 以稳定裕度影响因子矩阵观测控制负效应及超调现象等, 有效指导不同控制措施间协调配合。

4) 多稳定形态共存下交直流协调控制技术通过对功角、电压和频率并列式搜索, 能够适应复杂失稳形式, 及时跟踪控制负效应, 并且从控制效果可以反推多种稳定问题主导或共存失稳形态。

## 参考文献

- [1] YIN M, CHUNG C Y, WONG K P, et al. An improved iterative method for assessment of multi-swing transient stability limit[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2023-2030.
- [2] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.  
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [3] 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.
- [4] 周伟, 万振东. 特高压直流落点并网方式规划技术要求研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 46-49.  
ZHOU Wei, WAN Zhendong. Study on UHVDC terminal grid-connection mode planning techniques and requirements[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 46-49.
- [5] FANG Yongjie. Reflections on stability technology for reducing risk of system collapse due to cascading outages[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 264-271.
- [6] 徐泰山, 鲍颜红, 杨莹, 等. N-2 组合故障集的暂态功角稳定在线快速评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 122-126.  
XU Taishan, BAO Yanhong, YANG Ying, et al. Online fast transient angle stability assessment of N-2 contingency set[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 122-126.
- [7] 傅旭, 王宏, 杨欣, 等. 考虑 N-1 静态电压稳定约束的电力系统负荷裕度新算法[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 15-19, 33.  
FU Xu, WANG Hong, YANG Xin, et al. New approach to calculate load margin considering N-1 static voltage stability constraints of power system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 15-19, 33.
- [8] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0023-z
- [9] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.  
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [10] 韩文, 韩祯祥. 电压崩溃与功角不稳的关系[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 16-19.

- HAN Wen, HAN Zhenxiang. Relationship between voltage collapse and angle instability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 16-19.
- [11] 吴为, 汤涌, 孙华东, 等. 电力系统暂态功角失稳与暂态电压失稳的主导性识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5610-5617.
- WU Wei, TANG Yong, SUN Huadong, et al. The recognition of principal mode between rotor angle instability and transient voltage instability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5610-5617.
- [12] 顾卓远, 汤涌. 基于响应信息的电压与功角稳定实时紧急控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4876-4885.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong. Response-information based real-time power system voltage stability and angle stability emergency control scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4876-4885.
- [13] 徐式蕴, 吴萍, 赵兵, 等. 哈郑直流受端华中电网基于响应的交直流协调控制措施[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1773-1778.
- XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Hami to Zhengzhou[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1773-1778.
- [14] 张执超, 王增平, 方攀宇. 基于频率和电压稳定的紧急控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 149-155.
- ZHANG Zhichao, WANG Zengping, FANG Panyu. Emergency control strategy based on frequency and voltage stability[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 149-155.
- [15] 郑超, 马世英, 盛灿辉, 等. 交直流耦合作用弱化稳定性机理及应对措施[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 3-8.
- ZHENG Chao, MA Shiyong, SHENG Canhui, et al. Mechanisms and countermeasures for stability deterioration caused by interactions between AC and HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 3-8.
- [16] 项丽, 彭慧敏, 丁茂生, 等. 基于动态鞍点暂态动能灵敏度分析的紧急控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 129-133.
- XIANG Li, PENG Huimin, DING Maosheng, et al. Emergency control based on the sensitivity analysis of transient Kinetic energy of dynamic saddle point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 129-133.
- [17] 徐泰山, 丁茂生, 彭慧敏, 等. 交直流电力系统暂态安全稳定在线紧急控制策略并行算法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 174-180.
- XU Taishan, DING Maosheng, PENG Huimin, et al. A parallel algorithm for determining an online emergency control strategy of transient security and stability for AC-DC power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 174-180.

收稿日期: 2016-11-14; 修回日期: 2017-07-22

作者简介:

张红丽(1989—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析及控制研究; E-mail: zhanghongli@sgepri.sgcc.com.cn

刘福锁(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

李威(1976—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 周金梅)