

# 电力系统通用安控策略整定方法的研究

赵燕<sup>1</sup>, 张文朝<sup>2</sup>, 李轶群<sup>3</sup>, 高洵<sup>3</sup>, 顾雪平<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 南京南瑞集团北京监控技术中心, 北京 102200;  
3. 华北电网有限公司, 北京 100053)

**摘要:** 为解决当前查表式安控策略存在的严重故障计算量大、整定和维护复杂的问题, 提出了一种基于公式计算的通用安控策略整定方法。针对不同网架结构下可能出现的暂态稳定、动态稳定和热稳定问题, 研究了不同稳定形式下的所需安控措施量及影响因素, 建立了一种可修订参数的反映电网安控量与断面潮流关系的线性模型, 并提出了关键参数的整定方法。利用单机等面积定则证明了暂态稳定下断面潮流和安控量呈“凹曲线”的关系, 为暂稳下关键参数的取值范围和直线模型提供了依据。实际电网应用案例表明了所提方法较传统方法整定更简便、物理意义更加清晰, 具有较好的适用性。

**关键词:** 安控策略; 线性模型; 暂态稳定; 动态稳定; 热稳定

## Research on the general control strategy of power system tuning method

ZHAO Yan<sup>1</sup>, ZHANG Wenchao<sup>2</sup>, LI Yiqun<sup>3</sup>, GAO Xun<sup>3</sup>, GU Xueping<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. NARI Group Monitoring Technology Center in Beijing, Beijing 102200, China; 3. North China Grid Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** To solve the problems of the current security control policy of lookup table setting method which includes large amount of calculation and the complex setting and maintenance, a new general security control strategy based on formula calculator is presented. According to the stable form of transient stability, dynamic stability and thermal stability under different grid structures, the control strategy and influencing factors on the different stable forms are studied respectively, a linear model which can revise parameters is established to describe the control quantity and the section power flow value, and the tuning method of the typical key parameter is also put forward. By using single machine equal area criterion proves that the relationship between the section flow and the safety control of transient stability is "concave curve", which provides a basis for the range of key parameters and the linear model of transient stability. Practical application case shows that the proposed control strategy model is more convenient and has clearer physical significance compared with the traditional method, which has great application.

**Key words:** control strategy; linear model; transient stability; dynamic stability; thermal stability

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0102-06

## 0 引言

“三道防线”是我国电网长期安全稳定运行的成功经验, 其中第二道防线主要指采用稳定控制装置及切机、切负荷等紧急控制措施, 确保电网在发生概率较低的严重故障时能继续保持稳定运行。安全稳定控制策略是安全稳定措施的具体体现形式, 也是安全稳定控制装置的核心和基础<sup>[1-2]</sup>。

文献[3]研究了贵广交流通道投运后南方电网的安全稳定性能和天广直流闭锁、主通道交流线路的严重故障形式下的安全稳定措施, 在大量计算的

基础上, 提出了安稳控制系统分档成表的控制策略。文献[4-8]介绍了暂态稳定、动态稳定、电压稳定及频率稳定等多种稳定形态的分类和特点, 为研究不同稳定形态的安控策略奠定了基础。文献[9-10]对部分地区电网的安控策略整定方案进行了详细介绍, 文献[10-13]则对暂态稳定的切机原则的方案进行研究, 通过等面积定则对暂态稳定下的安控策略进行描述。文献[14-16]研究了粤北安稳系统的简化策略, 通过检测故障前控制断面的潮流, 计算切机量, 提出断面潮流与切机量的关系的概念, 实施快速有效的切机措施。

目前安全稳定控制策略的整定方法是基于分段函数的策略表, 即通过计算各方式下多个潮流断面发生严重故障下的安控量, 并将其用按故障形式整理为分档成表的安控策略。这种传统安控策略存在严重故障计算量大、划分档位多以及过切量较大等问题。因此, 本文针对传统安控策略整定方法的不足, 通过总结安控计算过程中的规律, 对暂态稳定、动态稳定以及热稳定形态下的安控策略整定方法进行研究, 提出一种更为简便快捷的新型通用安控策略整定方法。

## 1 传统安控策略方法简介

### 1.1 传统安控策略整定方法

对于待研究的网架, 传统安控策略的制定一般可分为 5 个主要步骤:

**Step1:** 计算正常接线方式下极限, 确定为基础方式。

**Step2:** 计算正常接线方式下安控措施。计算基础方式下的安控量, 按档位(如 300 MW 一档)降低断面潮流并计算相应潮流下的安控量, 直至临界稳定为止。

**Step3:** 计算各检修方式下的安控措施。方法同正常接线方式一样, 先求各检修方式的极限, 然后确定各检修方式下严重故障时的安控策略。

**Step4:** 总结措施, 分类整理。将正常接线方式和各检修方式下各个故障的安控措施分别整理, 得到各方式下的严重故障安控策略表。

**Step5:** 分档出表。每个故障单独形成一个安控策略表, 一般根据平均分配原则划分 3~5 个档位。为简化安控配置, 通常也将某些安控量接近的方式进行归并。

### 1.2 案例说明

以山西北部网架为例, 大同地区电网通过神雁双连接山西中部电网, 并通过大房三回与北京电网相连。该地区正常接线方式下的潮流如图 1 所示。

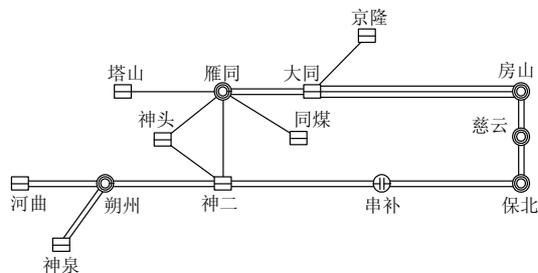


图 1 山西北部地区网架示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Northern Shanxi

正常接线方式下, 山西北部地区外送能力主要受神保一回断开后另一回热稳制约, 神保双回输送极限为 4 000 MW, 相应的由大房三回线和神雁双回线组成的断面的输送能力为 7 000 MW。表 1 是正常方式和大房检修下神雁双回线路发生严重故障时的安控策略表。

表 1 正常方式和大房检修下神雁双回故障安控策略

Table 1 Control strategy of Shenyan in normal mode and Dafang maintenance mode

方式	检测故障	检测断面	切机门坎	切机容量
正常方式			$4\ 900 \leq P < 5\ 400$	600
			$5\ 400 \leq P < 5\ 900$	1 400
			$5\ 900 \leq P < 6\ 400$	2 400
大房一回检修方式	神雁双掉故障	大房三回+神雁双回线	$6\ 400 \leq P$	3 500
			$3\ 500 \leq P < 4\ 000$	900
大房三回检修方式			$4\ 000 \leq P < 4\ 500$	2 000
			$4\ 500 \leq P$	3 500

表 1 列出了正常接线方式和大房检修方式下在神雁双回故障传统安控策略, 另外还有其他检修方式如大雁检修、神保检修等。用  $C_i$  表示总的计算次数, 则可用式(1)对其进行计算。

$$C_i = N_i P_i K_i D_i \quad (1)$$

式中:  $N_i$  为网络接线方式数量(正常接线方式和各种检修方式), 与网架有关, 网络简单时少, 网络复杂时多, 该网架中约为 7~8;  $P_i$  为划分档位数量, 约为 5~6;  $K_i$  为故障形式个数, 与网架有关, 网络简单则少, 网络复杂则多, 该网架中约为 5;  $D_i$  为每个故障下切机量的计算次数, 约为 5~7。

表 1 中所有方式各个故障的断面潮流调整约需几十次, 从式(1)可看出, 所有接线方式下的故障有几十个, 总的计算次数  $C_i$  近上千次。对于相对简单的山西北部网架, 发生严重故障时计算次数已较多, 对于更为复杂的网络此种计算方法将产生更大的计算量。

此外, 安控策略是根据分段函数的方法整定, 如表 1 中, 正常方式下断面潮流介于 5 400 MW 与 5 900 MW 之间都按照断面 5 900 MW 计算出的安控措施量 1 400 MW 来控制, 这也不符合安控措施量随着功率增加而加大的这一客观规律, 存在过切量较大的问题。同时, 由于网架变动导致策略表修改较为频繁, 而传统安控策略表中定值较多, 给后续的运行维护和升级改造带来一定困难。

## 2 通用安控策略的整定方法

### 2.1 不同稳定形态下安控措施

#### (1) 热稳定下的安控策略及关键参数

电网的热稳定性是以线路或者变压器是否过载为指标进行判断的。设线路发生  $N-2$  故障后, 各线路都无热稳定问题的断面潮流为  $P_0$ , 并将该值作为过载切机容量基值。设当前的断面潮流值为  $P$ , 若不考虑切机后线路潮流转移的问题, 线路的热稳定问题可采取“平切”的方法, 即过载切机量取  $D_p = P - P_0$ , 可以保证故障切机后无线路过载, 上述切机原则即为热稳定安控控制策略的切机原则。故热稳切机量与故障前断面的潮流呈斜率  $K=1$  的直线关系。

但当热稳的安控策略需要考虑不完整断面(只考虑完整断面中的部分线路)以及切机后功率的再分配的问题。在这两种情况下, 就不能采取“平切”, 则需要对计算公式中的  $K$  值进行修订。

#### (2) 暂态稳定下的安控策略及关键参数

若线路发生  $N-2$  严重故障后暂态失稳, 设无安控措施的断面潮流为  $P_0$ 。当断面潮流小于等于  $P_0$  时, 不需要切机; 当断面潮流大于  $P_0$  时, 切机量与断面潮流之间的关系比较复杂。大量计算表明, 断面潮流增加时, 切机量的增长速度更快, 即断面潮流和安控量的关系成“凹曲线”。确定用初始潮流和临界稳定的潮流对应的两点连线确定安控措施量, 这样中间各种工况下的安控量会比实际稍大, 但是在保证系统稳定运行前提下较为简单合理的控制策略, 并将此函数关系作为暂态稳定安控控制策略的原则。

#### (3) 动态稳定下的安控策略及关键参数

对于动态稳定问题, 大量的计算表明, 动态稳定下断面潮流降低的数值基本等于安控措施量, 故基本也可采取“平切”原则。

动稳也有不完整断面问题, 有时还需考虑切机敏感性的问题, 即由于电气距离及网架结构导致的切不同机组时, 相同断面潮流所需的切机量不同, 即切机顺序有一个优先级的排序。由于不同机组的切机敏感性不同, 可能会对动稳安控的  $K$  值有影响, 但一般会选择采取优先切除敏感性好的机组。

### 2.2 暂态稳定下的安控策略分析

下面重点讨论暂态稳定形式下的安控策略, 以正常方式下神雁双回线  $N-2$  严重故障为例进行说明。大房三回和神雁双回线路组成的断面潮流为 4 900 MW 不需要切机, 故取  $P_0$  为 4 900 MW, 将断面潮流  $P$  值作为纵坐标, 切机量  $D_p$  作为横坐标,

图 2 中的曲线显示了二者之间的关系曲线, 而直线是可以采用的简化的暂稳安控策略。暂稳的切机量与潮流之间是非线性关系, 所以采用直线拟合同样可以在切机之后保证系统安全稳定运行。式(2)给出了该直线的方程。

$$D_p = 1.75 \times (P - 4900) \quad (2)$$

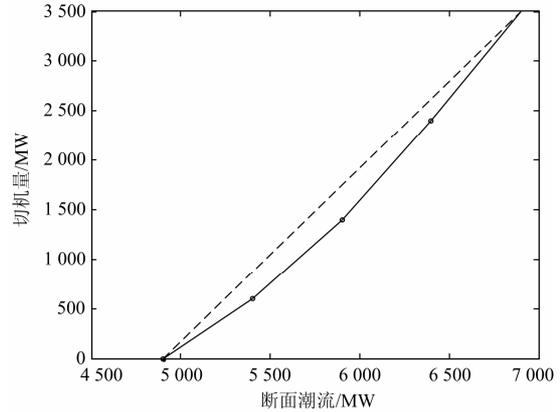


图 2 断面潮流与切机量之间的关系

Fig. 2 Relationship between power flow and the generator tripping value for transient stability

用等面积定则对单机无穷大系统暂态稳定切机进行简要的分析。故障前功率曲线为  $P_1$ , 切机措施主要切除了发电机的一部分惯量和机械功率, 由于安全稳定策略的整定是对线路进行三永  $N-2$  严重故障来校核, 故障后阻抗为无穷大, 功率降为 0, 故障切除后系统的功率曲线为  $P_{II}$ 。假设切机操作不改变发电机的不稳定平衡点, 切机后功率变化曲线如图 3 所示。

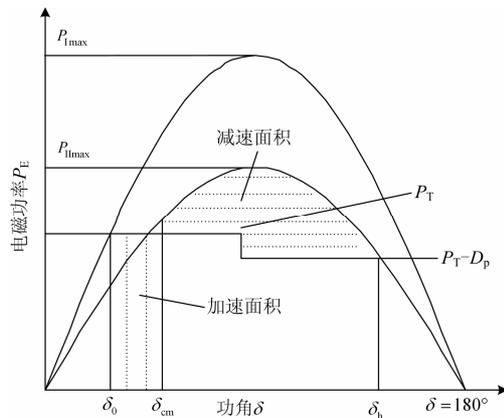


图 3 切机前后功率变化曲线

Fig. 3 Power characteristic curve of pre-fault and post fault

如图 3 所示, 上图是  $N-2$  故障前后系统的功率特性变化过程, 同时体现了初始功率增大时切机量的变化。  $P_T$  表示同初始潮流下原动机的机械功率,  $\delta_0$  为正常运行时发电机的初始功角,  $\delta_c$  为切除故障

时功角,倘若初始潮流时超过暂态极限传输功率,即加速面积超过减速面积,则需要通过切除发电机增大减速面积来保证系统稳定, $D_p$ 为切除的机组容量。

在给定  $P_T$  的情况下可以得到对应的初始功角  $\delta_0$ , 根据转子运动方程求取故障切除时刻功角  $\delta_c$ :

$$\frac{T_J}{w_0} \times \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T \quad (3)$$

其中, 带入初始条件  $t=0, \delta=\delta_0$ 。由于实际系统中采用的故障切除时间为 0.1 s。可求得:

$$\delta_c = \frac{1}{2} \frac{P_T w_0}{T_J} t^2 + \delta_0 \quad (4)$$

由图 3 所示, 将加速面积设为  $A_1$ , 减速面积分为两部分, 分别设为  $A_2$  和  $A_3$ 。它们可有列公式计算。

$$A_1 = (\delta_c - \delta_0) \times P_T = \frac{1}{2} \frac{P_T^2 w_0}{T_J} t^2 \quad (5)$$

由式(5)可见, 当初始潮流  $P_T$  增大时, 加速面积  $A_1$  是以平方的关系增长。由等面积定则可知, 加速面积等于减速面积。而减速面积由  $A_2$  和  $A_3$  两部分组成, 而加速面积  $A_1$  越大,  $A_2$  越小, 则  $A_3$  越大。又由于安控量  $D_p$  和  $A_3$  是呈正比的, 故初始潮流  $P_T$  越大, 安控量  $D_p$  增大的越快, 即反映在断面潮流和切机量关系的曲线中是呈“凹曲线”, 如图 2 所示。此结论是在单机系统发生三相短路的情况下推导的, 一般的, 对于在电网中发生其它故障形式, 也有断面潮流和安控量的关系呈“凹曲线”这一普遍现象。

尽管暂态稳定下断面潮流和安控量呈非线性的关系, 但是由于较难找到合适的函数来反映上述关系, 而线性模型相对简单, 实际工程中也常考虑一定的裕度, 所以用线性模型基本上可以反映电网的此种特性。综上所述, 暂态稳定安控策略的原则只需算出两个点, 即基础潮流下的安控量和临界稳定时的断面潮流, 据此求出安控量与潮流关系直线的  $K$  值及该直线的表达式。据此可计算其它任意断面潮流下的安控切机量。

### 2.3 通用安控策略的一般表示形式

根据上面总结的热稳、暂稳和动稳形式下的安控策略整定原则, 将其总结成一般形式, 应按照式(6)的切机量对相应机组进行切机措施。

$$D_p = K \times (P - P_0) \quad (6)$$

式中:  $D_p$  为安控切机量;  $K$  为切机系数, 综合考虑切机后系统能够保持安全稳定运行, 暂稳下根据两点法确定, 热稳和动稳下一般取 1;  $P$  为故障前线路功率和;  $P_0$  为线路临界稳定时的断面潮流。

### 2.4 通用安控策略表的整定

通过上节的讨论, 总结出在特定网架下的通用安控策略的整定的计算流程如下。

第一步: 计算正常接线方式下该网架输送极限  $P_{max}$ , 将其确定为基础方式。基础方式下校核  $N-2$  严重故障, 确定失稳形态及最大安控量  $D_{pmax}$ ; 计算该方式下  $N-2$  故障临界稳定时的断面潮流  $P_0$ 。

第二步: 计算各检修方式下的输送极限  $P_{max}$ , 计算极限方式下最大安控安控量  $D_{pmax}$  和临界稳定潮流  $P_0$ 。

第三步: 根据判断的稳定形态确定模型参数, 若为暂态稳定问题, 则利用  $(P_0, 0)$  和  $(P_{max}, D_{pmax})$  两点拟合直线, 求取斜率  $K$ ; 若为热稳或动稳问题, 一般采取“平切原则”, 取  $K \approx 1$ 。但还需具体问题具体分析, 可能需要其他的  $K$  值进行约束。

### 3 应用实例

对于通用安控策略的适应性, 采用前面提到的正常方式下山西北部神头-雁同发生  $N-2$  严重故障的案例进行验证。图 4 显示的是神雁双故障传统和通用策略以及实际需要的安控量与断面潮流的关系。从图 4 可以看出, 传统和通用安控策略都大于实际所需切机量, 但通用安控策略的切机量基本上都小于传统策略, 且策略采用这种分段函数式的表达, 本身不能体现切机量和断面潮流间关系, 物理意义不明确。

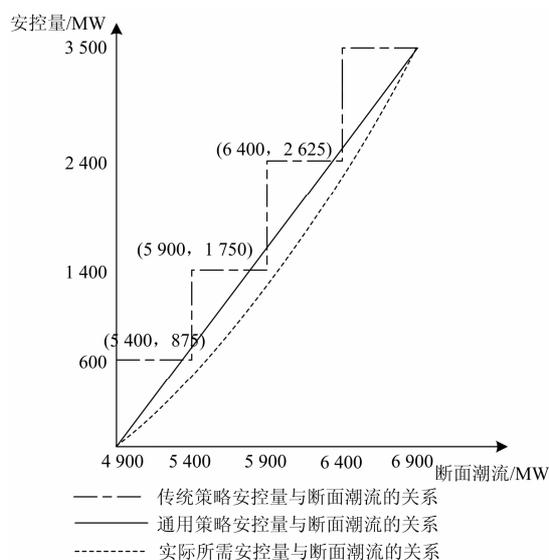


图 4 不同策略断面潮流和切机量的关系

Fig. 4 Relationship between power flow and the generator tripping value in different strategies

下面具体的针对式(1)中的通用安控策略, 将正

常方式下神雁双回故障各种方法的切机量进行了对比, 结果如表 2 所示。

表 2 正常方式下各种方法的切机容量的对比

Table 2 Cutting machine capacity comparison of various methods in normal mode

方式	检测故障	检测断面	切机门坎	实际需要切机容量	当前方法切机容量	通用方法切机容量
			4 900	0	0	0
正常方式	神雁双掉故障	大房	5 200	330	600	525
		三+	5 500	750	1 400	1 050
		神雁	5 800	1 200	1 400	1 575
		双	6 100	1 730	2 400	2 100
			6 400	2 350	2 400	2 625

从表 2 可看出, 通过实际需要的切机容量与通用方法的切机容量对比可以看出, 通用安控策略的切机量均不小于实际需要的切机量, 所提通用安控策略更有利于保证电网的安全稳定运行; 传统方法过切量相对比较严重, 而通用方法在整体上过切量较小。

从大量测试结果看, 所提通用安控策略整定方法应用于安控计算是可行的, 而且能够有效减少计算量, 显著提高计算效率。

#### 4 结论

本文提出的通用安控策略整定方法考虑了不同稳定形式的特点, 并用单机等面积定则证明了暂态稳定下断面潮流和安控量呈“凹曲线”的特点, 综合各种因素, 确定采用断面潮流和安控量的线性模型, 并研究了该模型中的关键参数的整定方法。本方法可有效减少  $N-2$  严重故障的计算量, 较传统策略物理意义更明确, 该方法已在华北电网山西北部 and 蒙西电网的安控策略制定中得到应用。

此外, 所提安控策略整定方法也同样适用于电压稳定和频率稳定等稳定形态下的安控策略整定。对于各典型网架结构下的不同稳定形态, 所提模型参数  $K$  的取值范围仍有待进一步的研究。

#### 参考文献

[1] DL/T 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 755-2001 the guide and standard for power system security and stability[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[2] DL/T 723-2000 电力系统安全稳定控制技术导则[S]. 北京: 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2000.

DL/T 723-2000 technical guide for electrical power system security and stability control[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

[3] 马世英, 张文朝. 天广、贵广交直流输电系统安稳控制策略研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.  
MA Shiying, ZHANG Wenchao. Study on TianGuang & Gui-Guang HVDC transmission system security and stability control strategy[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2003.

[4] 李晓明. 电力系统几个基本概念的分析与探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 130-132.  
LI Xiaoming. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 130-132.

[5] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1387-1401.

[6] 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 Xiaoping, XIE Kaigui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.

[7] 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.

[8] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.  
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.

[9] 曾永刚, 秦华, 方勇杰, 等. 韶关电网在线预决策安全稳定控制系统的设计及实施[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 45-47.  
ZENG Yonggang, QIN Hua, FANG Yongjie, et al. Design and implementation of an online pre-decision based system protection scheme for the Shaoguan Power

- System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 45-47.
- [10] 张立平, 殷幼军, 马怡晴, 等. 湖北黄冈、黄石地区安全稳定控制系统方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 79-82.  
ZHANG Liping, YIN Youjun, MA Yiqing, et al. Security and stability control system for Huanggang and Huangshi network of Hubei Province[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 79-82.
- [11] RAJU R, SUBRAMANIAM N. Transient stability analysis employing equal area criterion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011: 275-280.
- [12] 李常刚, 张恒旭, 刘玉田, 等. 考虑机组低频保护的电力系统暂态频率稳定评估[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 271-278.  
LI Changgang, ZHANG Hengxu, LIU Yutian, et al. Power system transient frequency stability assessment considering unit underfrequency relay protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [13] 余贻鑫, 杨涛, 刘辉. 一种暂态稳定紧急控制策略筛选[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 1-4.  
YU Yixin, YANG Tao, LIU Hui. Filtering method for transient stability emergency control strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 1-4.
- [14] ODUN-AYO T, CROW M L. Structure-preserved power system transient stability using stochastic energy functions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 99(27): 1-5.
- [15] 杨振刚, 吴国丙, 罗向东, 等. 粤北电网安全稳定控制策略及切机原则[J]. 南方电网技术, 2009, 3(2): 15-17.  
YANG Zhengang, WU Guobing, LUO Xiangdong, et al. The safety-stability control strategy and tripping principle for northern Guangdong Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 15-17.
- [16] 王珂, 吴烈鑫, 张荫群, 等. 粤北电网安全稳定控制系统的研究[J]. 南方电网技术研究, 2007, 3(3): 42-45.  
WANG Ke, WU Liexin, ZHANG Yinqun, et al. Research of the security-stability control system for normal Guangdong Grid[J]. Southern Power System Technology Research, 2007, 3(3): 42-45.

---

收稿日期: 2014-05-21

作者简介:

赵 燕(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 550789431@qq.com

张文朝(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制;

李轶群(1974-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统继电保护及变电站综合自动化的研究。

(编辑 张爱琴)