稳控装置无故障跳闸判据存在的问题及解决方案

董希建，李雪明，秦 天，李惠军

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司，江苏 南京 210003)

摘要：为提高电网安全稳定控制系统运行的可靠性，提出防止无故障跳闸判据误判的诸多防误判据。指出在当前网内安全稳定控制系统中运行的仅基于本地电气量的无故障跳闸判据对一些方式和扰动的不适或缺陷。研究了安全稳定计算分析的稳定判据，指出应根据系统所要解决的具体稳定问题，有针对性地设计行之有效的防误判据。基于本地电气量的无故障跳闸判据，在结合了有效的防误判据之后，在各级电网的安全稳定控制系统中得到了广泛应用。运行经验表明，这些防误判据在保证安全稳定控制措施时效性的基础上，有效地提高了安全稳定控制系统运行的安全性，证明了防误判据的可靠性。

关键词：安全稳定控制系统；无故障跳闸；防误判据；安全稳定计算分析；稳定判据

Problems and solutions of no-fault trip criterion in security and stability control system

DONG Xijian, LI Xueming, QIN Tian, LI Huijun

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: In order to improve the reliability of the security and stability control system, this paper proposes some criterions against mal-operation which can prevent the no-fault trip's misjudgment. Because the no-fault trip criterion is only based on local electrical quantities, it will misjudge when some disturbances occur. It researches the stability criterion of safety and stability calculation analysis and points out that we should design the criterions against mal-operations according to the specific problems. The no-fault trip criterion combined the proposed criterions against mal-operations has been widely used in the grid. Operation experience show that it can ensure the system's timeliness and security, so the criterions against mal-operations are reliable.

Key words: security and stability control system; no-fault trip; criterions against mal-operation; security and stability analysis; stability criterion

中图分类号： TM71 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)17-0113-06

0 引言

随着特高压交直流工程的建设和投运，中国进入了跨大区、特高压、交直流混联电网运行时代。电力系统的稳定问题比以往更加突出，安全稳定控制装置(系统)已成为保障我国电网安全稳定运行不可或缺的重要手段。安全稳定控制装置(系统)的动作行为正确与否将直接影响到大电网的安全稳定运行。

跳闸判据和稳定控制策略是安全稳定控制装置(系统)的核心技术。准确判别出设备跳闸的故障类型是装置决策的重要前提，稳定控制所指设备跳闸包括：输电线路故障跳闸与无故障跳闸，变压器跳闸，发电机组跳闸[1]。本文重点讨论输电线路的无故障跳闸。

输电线路故障跳闸一般接入线路主保护的分相跳闸接点信号，以电气量为主判据，判据明确，运行经验表明判据是安全可靠的[2]；而无故障跳闸判据，由于仅采用电气量作判据，在一些运行方式下、特定扰动发生时，有误判的可能性，实际运行中已发生多起误判造成装置误动事故。

本文通过研究分析无故障跳闸判据设计原理及其误判可能性，指出无故障跳闸判据增加辅助校验和防误性辅助判据的必要性，并结合安全稳定分析的稳定判据提出行之有效的措施，提高无故障跳闸判据的可靠性。

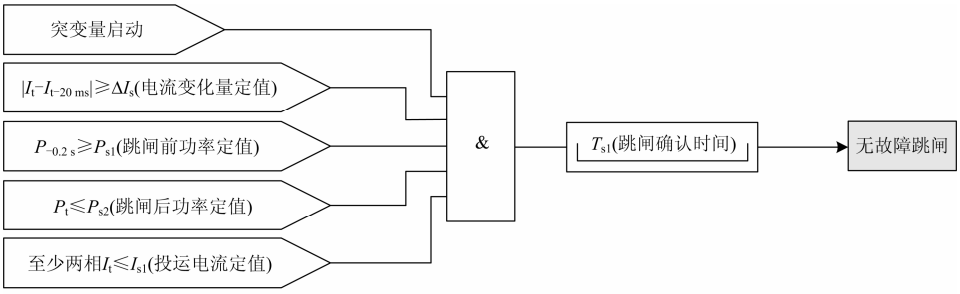
基金项目：国家科技支撑计划资助项目(2013BAA02B01)；国家电网公司大电网重大专项项目二课题 6 资助项目(SGCC-MPLG003-2012)

1 常见的无故障跳闸判据

目前，在安全稳定控制装置中使用的无故障跳闸判据主要有传统无故障跳闸判据、改进型无故障跳闸判据和阻抗判据三种，这些判据都基于本地电气量变化特征来识别无故障跳闸，其中改进型无故障跳闸判据和阻抗判据都是在传统无故障跳闸判据的基础上演化而来，通过扰动特征同步限制或者增加特征判据形成。

1.1 传统无故障跳闸判据

1) 扰动前有功功率大于定值 P_{s1}；2) 扰动后有功功率小于定值 P_{s2}；3) 扰动后至少有两相电流小于定值 I_{s1}；4) 扰动过程中电流有效值在一个基波周期前后之差大于定值ΔI_s；5) 满足扰动过程、同时避免将系统中发生的其他扰动引起的潮流转移误判为无故障跳闸，再增加一个跳闸延时确认定值。判据逻辑如图 1 所示。



注：I_t为当前电流有效值；$I_{t-20\,ms}$为一个周波前电流有效值；$P_{-0.2\,s}$为启动前200 ms有功功率；P_t为当前有功功率。

图 1 传统无故障跳闸判据逻辑框图

Fig. 1 Logic diagram of no-fault trip

1.2 改进型无故障跳闸判据

基于传统无故障跳闸判据并进行适当改进：用电流突变识别扰动过程时，增加浮动门槛技术以跟踪电流的变化；定义扰动过程更严格，即扰动后的功率和电流小于门槛值的时刻必须同时落在扰动过程中电流突变大于门槛值的时间区间内时，才确定为无故障跳闸满足的计时开始时刻[3]。

1.3 阻抗判据

当潮流转移和线路末端无故障跳闸时，在线路始端(装置安装处)二者的测量阻抗在幅值或者阻抗角具有明显差别，判据依据此原理研制[4]。

通过增加电气扰动特征来进一步准确识别的方法仍然是建立在传统的无故障跳闸判据之上，判断线路始端无故障跳闸时，扰动后的电流门槛值 I_{s1} 更小(理论值为零，一般按躲过 TA 测量误差设计)；同时，增加“扰动后测量阻抗及功率因数等于线路开路时的数值”用于区分线路末端无故障跳闸和潮流转移。

2 无故障跳闸判据误判案例及分析

运行经验表明：上述三种判据在系统发生短路故障、失步振荡、低频振荡、常规潮流转移等各种非无故障跳闸情况时，不会误判；而在真正发生无故障跳闸时，不会拒判。判据是可靠的。

但近年来，系统中发生过多次其他的扰动引起的潮流转移误判为无故障跳闸事故。一般表现为在某些运行方式下大机组跳闸引起系统内潮流的重新分配[3]或者直流系统调整负荷时导致相邻交流线路潮流急剧变化时[5]，误判为无故障跳闸。

2.1 大机组跳闸导致的误判

2.1.1 无故障跳闸误判的一般规律

传统无故障跳闸判据和改进型无故障跳闸判据的误判经常发生在扰动之后潮流转移并持续在 0 的情况下。实际上，电网运行时，往往就会安排或者说存在发生一个扰动就造成交流线路功率突降为 0 的运行方式。

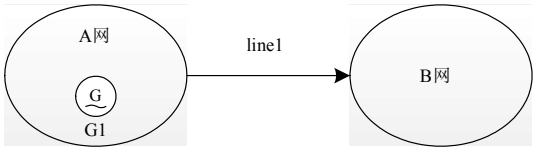


图 2 两个电网联系图

Fig. 2 Relation of two power grids

在图 2 中，A、B 网分别为送、受端电网，G1 是 A 网内的某台大机组。经计算分析[3]，A 网内大机组 G1 跳闸初始瞬间联络线 line1 有功功率突降接近 0 发生在特定情况下，即满足公式 $\frac{y}{x}=\frac{y-y'}{y}$，其中：$x$ 为 G1 跳闸前出力大小；y 为 G1 跳闸前联络线 line1 的输送功率；y' 为 G1 跳闸初始瞬间联络线的输送功率。

2.1.2 无故障跳闸误判的特例

上述公式或许不能够直观地表达出这种情况的多发性，甚至会被认为是小概率事件。那么图 3 所示电网结构下的运行方式，则是上述情况的一个特例(y/x=1)，但却是某些地区电网经常存在的运行方式。

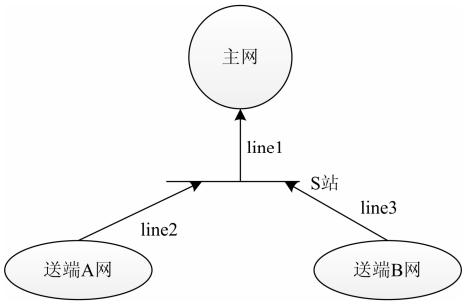


图 3 某地区电网结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of one area power grid

在图 3 中，送端 A 网是小水电集中上网区，送端 B 网是火电上网区。当 A 网内水电发电量与本地用电量基本持平时，B 端电网火电机组安排计划检修、运行机组跳闸时，安装在 S 站的安控装置将误判输电线路 line1 无故障跳闸。按照制定的安控策略，在判出 line1 跳闸后，将实施优先切除 A 网内的水电线路以解决稳定问题，但这显然是错误的。

2.1.3 其他情况下的误判案例

在实际应用中，“大机小网”的电网与主网的联络线，在小网内大机跳闸引起误判联络线跳闸，时有发生。如图 4 所示的电网结构，line1 的电气距离小于 line2，在 C 网主变下网负荷极小情况下，若 line3 跳闸，则安装在 M 处的装置可能误判 line2 为无故障跳闸，错误地采取切机措施。

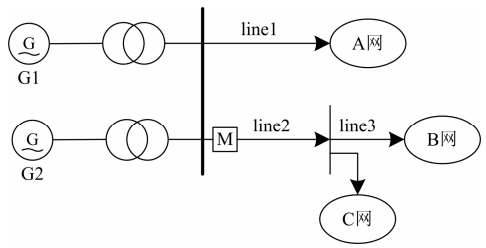


图 4 特定电网结构及运行方式

Fig. 4 A power grid's structure and operation mode

其余的，诸如机组检修方式下，大机组跳闸、电厂送出线路误判为无故障跳闸等都是相似案例，虽然不会产生实质性后果，但从判据本身来讲是误判。

2.2 直流系统调整负荷导致的误判

发生 2.1 节所述的情况，阻抗判据的本侧无故障跳闸判据条件都满足，即跟传统无故障跳闸判据和改进型无故障跳闸判据一样，都会误判。那么，对侧无故障判据在什么情况下会误判呢？

文献[5]描述了一个直流减负荷造成阻抗判据误判对侧无故障跳闸的案例。导致阻抗判据误判的根本原因在于：直流系统减负荷期间，为保证电压稳定，一般伴随着交直流滤波器的投切，这就为测量阻抗角与开路阻抗角近似相等创造了条件。在减负荷初期，如果导致相邻的交流线路潮流倒向甚至为 0，满足了测量阻抗与开路阻抗幅值相等的条件；减负荷后期，随着滤波器的切除，无功功率波动，若再满足测量阻抗与开路阻抗阻抗角相等的条件，则阻抗判据误判。

实际上，330 kV 及以上电压等级线路的充电功率基本上予以补偿[6]，若其他扰动造成该交流线路潮流倒向为 0，也有误判的可能。

这说明，目前的阻抗判据在个别尤其在直流近区的交流线路上应用时，存在误判风险。随着直流输电系统的发展，直流输电系统附近交流线路的无故障跳闸判据如何取用，特别值得深入研究。

3　无故障跳闸判据拒判案例及分析

在只存在热稳定问题的系统中，一般仅用无故障跳闸判据识别线路跳闸，即如果是故障跳闸也要等故障发生、跳开线路后，判为无故障跳闸。

实际上，线路故障切除后，电流互感器二次回路存在幅值较大的二次残余电流，并且一般需要几百毫秒才能衰减为 0。在这个时间内，扰动过程早已结束，若仍采用改进型无故障跳闸判据，则会拒判。在这种情况下，只能采用传统无故障跳闸判据。

4　无故障跳闸防误判据必要性和可行性探讨

可见，无论是哪种无故障跳闸判据，只要它仅基于本地电气量变化特征，在某一些方式下是存在误判的可能性的。而作为安全稳定控制系统工程的实施者，要坚持“安全可靠”的原则，只要存在哪怕一种误判的可能性，都要想办法避免它。

那么，应该从哪些方面入手，确定无故障跳闸的防误判据呢？

防止电网失稳的控制包括：暂态稳定控制、平息低频振荡控制、电压控制、频率控制和消除过负荷控制[1]，结合系统安全稳定计算的暂态稳定、动态稳定、电压稳定、频率稳定和热稳定的稳定判据[6]，我们可以从便利地提取工程上可行的辅助校验手段角度入手，寻求防止线路无故障跳闸判据误判的行之有效的措施。

4.1 暂态稳定

稳定判据的考察对象是系统中任意两台机组的相对角度摇摆曲线和系统中枢点电压[7-8]。

监测功角差摇摆曲线是困难的，但可以采取另外行之有效的措施防误，比如：单线运行时，无故障跳闸瞬间，必然伴随着相关元件功率的剧烈波动；双线运行时，判单线无故障跳闸则必须经过另一回线功率突增确认。

4.1.1 单回线

单回线无故障三相断开不重合是《电力系统安全稳定控制技术导则》里特别指出的第 II 类大扰动之一。在应用时，可以提取相关元件的功率变化作为辅助判据。例如：如图 5 所示，联络线 L1 若无故障跳闸，则下网主变 T1 一般功率突增。

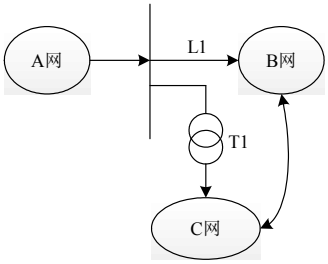


图 5 特定电网结构

Fig. 5 A power grid's structure

针对 2.1 节阐述的网内大机组跳闸可能引起误判联络线跳闸的情况，可考虑引入大电源送出线的有功信息，当大电源送出线有功突然大幅度降低时，立即闭锁该联络线跳闸的判断。

类似的，当电厂送出线无故障跳闸需采取暂态稳定控制措施时，在判断送出线无故障跳闸前如果检测到机组跳闸也可闭锁判断。

4.1.2 两回及以上线路

《电力系统安全稳定控制技术导则》在涉及故障形式时强调了对于向重要受端系统供电的同一断面又属同一走廊的两回线故障或无故障相继跳闸的情况，可根据电网的重要程度以及相关管理规定纳入到第 II 类扰动中考虑。

超高压及以上电压等级系统经常采用 3/2 甚至 4/3 接线方式，220 kV 及以上电压等级的输电线路断路器一般是分相操作机构。从概率上讲，在实际电网运行中，并列双回线同时无故障跳闸不会发生。

基于此，在设计安全稳定控制系统时，当故障跳闸和无故障跳闸均需采取暂态稳定控制措施时，N−1 时，若要判断单线无故障跳闸时，可经相邻线功率突增确认；N−2 及以上线路故障(跳闸)，必须至少有一回是故障跳闸才行。

特别需要指出的是，如果采用该辅助判据，则在稳定计算时要计算输电线路所在的对侧站母线发生故障是否存在暂态稳定问题，并在对侧站安装装置实施母线故障后的暂态稳定控制措施(在双母线接线方式下，如果平行双回线接入同一段母线，则在该段母线故障时，会将双回线同时跳开，在本侧的站/厂就表现为同时无故障跳闸)。

4.2 动态稳定

稳定判据的考察对象是系统阻尼比[9-10]。

安全稳定控制装置无法检测和计算系统阻尼比，无故障跳闸判据的辅助判据可参考 4.1 节。

4.3 电压稳定

稳定判据的考察对象是暂态、动态过程中和动态平息后的系统中枢点母线电压[11]。

母线电压容易检测，辅助判据一般可设计为

$$U \le U_{\mathrm{L}},\ t \ge t_{\mathrm{L}} \tag{1}$$

式中：U 是母线电压有效值；U_{L} 是低电压定值；t 是母线电压满足小于等于低电压定值的时间；t_{L} 是母线电压判为低压延时定值，可取 20 ms。

由于在暂态、动态过程中，对中枢点电压持续低的考察时间为秒级，辅助判据中的低压确认时间 t_{L} 不会影响暂态稳定控制的快速性。

4.4 频率稳定

稳定判据的考察对象是任何时刻和事故后的系统频率。

系统频率容易检测，选取装置易于采集的线路或者母线频率即可。辅助判据一般设计为

$$f \le F_{\mathrm{L}},\ t \ge t_{\mathrm{L}} \tag{2}$$

$$f \ge F_{\mathrm{H}},\ t \ge t_{\mathrm{H}} \tag{3}$$

式中：f 是线路或母线频率；F_{L}(F_{H})是低频(过频)定值；t 是频率满足小于(大于)等于低频(过频)定值的时间；t_{L}(t_{H})是频率判为低频(过频)延时定值。

在防止频率崩溃的控制中，当联络线跳闸导致系统内功率缺额过大或过剩过大时，要采取跳闸联切措施时，增加上述频率辅助判据也是有效的。

安全稳定计算分析的频率稳定判据考察任何时刻的频率，且不带延时。实际上，通过观察系统的频率响应曲线，在扰动初期，由于伴随着潮流的重新分配，系统频率波动大、周期长[12]。此时，增加宽松的频率校验手段不会影响到控制措施的快速实施。

以某系统频率稳定判据为例：暂态过程中系统频率在 47.5~51.5 Hz 之间，稳态后的系统稳态频率

维持在 49.5~50.5 Hz 之间。则在受端系统中的频率防误判据可选择为：f ≤49.90 Hz，t ≥0.01 s(躲过测量误差即可)。

4.5 热稳定

稳定判据的考察对象是正常方式下的设备正常负载能力和事故后的设备事故过载能力[13]。

由于稳定控制以消除过负荷为目标，过负荷判据为主判据，相邻元件无故障跳闸为辅助判据。作为过负荷判据成立后的确认条件，无故障跳闸判据一般会尽量简化，如在一些工程中，将无故障跳闸判据简化到只剩下如下条件。

$$I_t \le I_{s1} \text{ 或 } P_t \le P_{s2} \tag{4}$$

式中：I_t 和 P_t 分别为电流和有功功率值；I_{s1} 和 P_{s2} 分别为确认相邻元件无故障跳闸或停运的定值。此即所谓的“大、小电流(功率)判据”，在仅存在热稳定问题的系统中，这是常见的消除过负荷控制方案。

4.6 其他无故障跳闸判据

文献[5]描述了一种无故障跳闸判据，该判据直接在传统无故障跳闸判据或阻抗判据里增加分相跳闸信号条件。应用在需要明确区分输电线路跳闸类型(故障跳闸或无故障跳闸)并采取不同的控制措施或控制量的系统中。

该判据的可靠性前提是：对于分相操作的断路器，不考虑操作机构三相同时偷跳。其中，分相跳闸信号是所有保护动作出口的总信号，即是将开关跳闸回路的三相跳闸信号重动后接入到安全稳定控制装置。

其网内运行经验表明，该判据是可靠的，虽然增加了分相跳闸信号作为条件，但并未影响到暂态稳定控制的快速性。

5　结语

防止无故障跳闸判据误判是安全稳定控制系统工程实施时的一项重要工作。鉴于基于就地电气量的无故障跳闸判据并不完全可靠的现状，需要安全稳定计算分析和安全稳定控制专业人员共同努力，在稳定分析时就入手提取可靠、有效并便于装置实现的校验手段和防误判据。作为电力系统稳定控制技术的实施者，要有多重防误的意识，希望本文能够引起安全稳定计算分析和安全稳定控制专业人员对防误判据的重视。

另外，在具体选取校验手段和防误判据时，不能以牺牲暂态稳定控制的快速性为代价，要确保安全稳定控制装置(系统)的整组动作时间在系统稳定允许的范围之内，以保证装置的动作速度和控制内容能满足稳定控制的有效性。

参考文献

[1] GB/T 26399-2011 电力系统安全稳定控制技术导则[M]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

[2] 董希建, 李德胜, 李惠军, 等. 电网安全稳定控制装置线路故障跳闸判据的改进[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 73-78.
DONG Xijian, LI Desheng, LI Huijun, et al. Improvement of line fault trip criterion of power system security and stability control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 73-78.

[3] 蔡敏, 孙光辉, 吴小辰, 等. 稳定控制所用交流设备跳闸判据的分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 46-51.
CAI Min, SUN Guanghui, WU Xiaochen, et al. Analysis and application of AC fault criterion in power system control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 46-51.

[4] 方勇杰, 徐海波. 基于本地电气量的无故障跳闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 33-35.
FANG Yongjie, XU Haibo. A new method of identifying non-fault line tripping based on local electrical measurements[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 33-35.

[5] 王伟, 陈军, 余锐, 等. 区域型安全稳定控制装置无故障跳闸判据运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 120-124.
WANG Wei, CHEN Jun, YU Rui, et al. Analysis of non-fault tripping criterion operation for area-based stability control device[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 120-124.

[6] DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[7] 黄玉龙, 刘明波. 求解暂态稳定约束最优潮流的混合算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 229-238.
HUANG Yulong, LIU Mingbo. Hybrid algorithm for solution of transient stability constrained optimal power flow[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 229-238.

[8] 李兆伟, 贺静波, 方勇杰, 等. 计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 116-120.
LI Zhaowei, HE Jingbo, FANG Yongjie, et al. Research

on the method to set reclosing time of power plant transmission system considering transient stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 116-120.

[9] 智勇, 王官宏, 肖洋, 等. 750 kV 线路投运后甘肃电网动态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 114-118.
ZHI Yong, WANG Guanhong, XIAO Yang, et al. Dynamic stability analysis of Gansu power grid after 750 kV lines was put into operation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 114-118.

[10] 郑伟, 鲍颜红, 彭慧敏, 等. 基于受扰轨迹模式分析的动态稳定辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 79-83.
ZHENG Wei, BAO Yanhong, PENG Huimin, et al. Dynamic stability auxiliary decision-making based on mode shape analysis of disturbed trajectory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 79-83.

[11] 陈文广, 刘明波. 结合详细和准静态模型的长期电压稳定全过程混合动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 242-252.
CHEN Wenguang, LIU Mingbo. Full-process hybrid dynamic simulation of long-term voltage stability by combination of detailed and quasi steady-state model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 242-252.

[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, 2013, 28(2): 271-278.

[13] 周晓宁, 徐伟, 胥传普, 等. 计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 61-66.
ZHOU Xiaoning, XU Wei, XU Chuanpu, et al. The assistant decision-making for power grid equipment overloading considering load transfer actions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 61-66.

收稿日期：2014-11-05； 修回日期：2015-02-09

作者简介：

董希建(1982-)，男，通信作者，硕士，工程师，主要研究方向为电力系统安全稳定控制；E-mail: dongxijian@sgepri.sgcc.com.cn

李雪明(1965-)，男，硕士，研究员级高级工程师，主要研究方向为电力系统安全稳定控制。

(编辑 姜新丽)