DOI：10.3969/j.issn.1000-1026.2012.01.022

针对电网 3/2 接线方式的设备风险在线辨识方法

闪 鑫[1]，戴则梅[1]，曹 路[2]，汪德星[2]
（1. 国电南瑞科技股份有限公司，江苏省南京市 210061；2. 华东电力调度中心，上海市 200002）

摘要：3/2 接线方式由于具有供电可靠性高、运行调度灵活、倒闸操作方便等优点，在 500 kV 厂站和部分 220 kV 枢纽变电站得到了广泛应用。但是，该接线方式在一次设备或开关处于检修方式下时，某些故障模式可能会造成多个设备的停电。基于网络拓扑分析和保护动作逻辑的设备风险在线辨识技术，能够针对 3/2 接线方式下的一次设备或开关检修，自动识别出具有 $N-2$ 以上停电设备的潜在故障模式，提醒调度运行人员；同时，结合静态安全分析、动态安全分析以及检修计划，实现大电网的设备风险在线防控。

关键词：设备风险；风险防控；网络拓扑；保护逻辑；预想故障集

0 引言

在 500 kV 厂站及部分 220 kV 枢纽变电站，3/2接线方式已得到广泛应用[1]。3/2 接线方式最大的优点是母线故障时不会引起相关线路的停运，供电可靠性得到了有力保障。在电网实际运行中，采用 3/2 接线方式的厂站不可能时刻处于全接线方式运行，在相关设备或开关检修时，单一设备的故障就会引起多个设备停运，有时甚至是全站停运，这种潜在的故障模式需要及时地告知调度运行人员，进行运行方式的调整，避免故障的发生，或者预先做好事故预案，在故障真正发生时能够心中有底。

本文提出了一种基于网络拓扑分析和保护动作逻辑的设备风险在线辨识技术，能够快速识别电网中潜在的严重故障模式，提醒调度运行人员加以处理，从而避免电网中严重故障的发生。同时，设备风险识别出的严重故障集与电网静态安全分析以及在线安全稳定分析相结合，将严重故障集作为电网静态安全分析以及在线安全稳定分析的预想故障集的一部分，从而有针对性地解决将预警目标从单故障风险延拓到群发性相继故障风险时带来的维数灾问题[2]，极大地提高了电网安全稳定运行水平，增强了大电网的风险防控能力[3-7]。

1 算法实现

基于网络拓扑分析和保护动作逻辑原理的在线设备风险辨识技术，能够利用状态估计计算的结果，结合电网的实际运行方式，在线识别处于运行风险中的设备，并形成静态安全分析以及在线安全稳定分析所需要的故障集。

需要说明的是，根据以往继电保护装置运行统计资料，在超高压电网尤其是 3/2 接线方式下，主要的故障模式为：①设备故障，开关和保护正确动作；②设备故障，开关拒动。在下文分析中，主要考虑这 2 种故障模式，其他故障模式概率远小于这 2 种，不再考虑。

同时，考虑到静态安全分析和在线安全稳定分析的预想故障集已考虑了 $N-1$ 的情况，对上述故障模式只考虑 $N-2$ 及其以上的情况。需要说明的是，本文中所说的预想故障集的设备个数是指实际影响潮流变化的设备个数，这主要是因为本文所针对的是 3/2 接线方式。在 3/2 接线方式下，单一母线故障不会引起潮流变化，而单一母线故障并伴随一个开关拒动将影响潮流变化，这一点与其他接线方式有所不同。因此，在本文所述的预想故障集的设备中不包括母线设备，这样区分也更好地体现了静态安全分析和在线稳定分析是基于潮流计算结果，而不是基于设备个数。

1.1 故障模式识别

故障模式识别就是根据实时电网运行方式，采用网络拓扑分析[8]技术，在线搜索出具有运行风险的设备以及对应的预想故障模式。

1.1.1 风险设备

风险设备是指该设备处于正常投运状态时，相邻设备的故障会引起该设备停运。如图 1 所示，其接线方式为 3/2 接线方式，空心表示开关合位，灰色表示开关分位（下同），甲线边开关处于检修状态。

收稿日期：2011-01-28；修回日期：2011-05-04。
国家科技支撑计划资助项目（2008BAA13B06）。

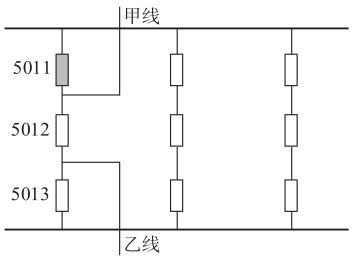

图 1 边开关检修下的厂站接线图
Fig. 1 Single-line diagram of substation with side breaker repairing

当乙线故障时,开关 5012 和开关 5013 跳闸,则甲线将从运行状态变为停运状态,即由于乙线故障引起甲线停运;若开关 5011 处于合位,则乙线故障不会引起甲线停运。

由上述分析可知,设备处于风险中的根本原因是该设备所对应的开关处于检修中。搜索风险设备的策略也就是根据电网实时运行方式,在线扫描处于分位的开关信息,再根据网络连接关系和拓扑搜索到该开关所连接的设备,则该设备即是满足上述条件的风险设备。

需要注意的是,在搜索到风险设备时需要进一步判断其接线方式,若该设备本身只有一个开关,则该设备本身已属于停运状态,不再纳入风险设备的范畴中。

1.1.2 预想故障模式

在上述风险设备的基础之上,进一步形成可导致风险设备处于停运状态的预想故障模式。

预想故障模式主要包括 2 类:一类是单一设备故障,开关和保护动作正常,这类故障在电网中发生概率较高;另一类是单一设备故障,且有单一开关拒动,这类故障模式虽然比第 1 类故障模式概率低很多,但在实际电网中也时有发生,较其他故障模式(多个开关同时拒动或多个设备同时故障)概率要大得多,且一旦发生,对电网冲击很大,是电网运行生产单位需要重点防范的故障模式。

根据风险设备拓扑搜索通过其合位开关连接的设备,则该设备故障且无开关拒动就将导致风险设备停运;在单一故障的故障设备基础上,进一步搜索故障设备通过开关所连接的设备,则其所连接设备故障且所连接开关拒动也将导致风险设备停运。

下面举例加以说明。如图 1 所示,甲线为风险设备,根据甲线所连接合位开关 5011 拓扑搜索连接设备,可找到乙线,则乙线故障且无开关拒动就将导致甲线停运。在上述故障的基础上,故障设备为乙线,拓扑搜索乙线通过开关 5013 所连接设备,可搜索到母线,则母线故障且所连接开关 5013 拒动,也将导致风险设备甲线停运。

1.2 保护动作逻辑

设备风险中的另一项关键技术就是要模拟设备故障时保护动作跳闸的逻辑,根据保护动作跳闸的逻辑设置相应的开关处于分位。

保护动作跳闸逻辑主要分为 2 类:第 1 类为单一设备故障且无开关拒动;第 2 类为单一设备故障且有开关拒动。

1.2.1 无开关拒动的单一设备故障

无开关拒动的单一设备故障的保护动作跳闸逻辑比较简单,利用网络拓扑分析,找到故障设备所连接的所有开关,并将其开关置于分位即可。如图 1 所示,根据故障模式识别的结果,模拟乙线故障情况下的保护动作跳闸逻辑,采用网络拓扑分析技术,搜索到乙线所连接开关为 5012 和 5013,根据保护动作逻辑原理,乙线设备故障在无开关拒动的情况下,开关 5012 和 5013 跳闸,通过模拟开关 5012 和 5013 跳闸逻辑,进一步进行局部网络拓扑分析,可得到乙线故障下,乙线和甲线同时停运的结论。

1.2.2 有开关拒动的单一设备故障

有开关拒动情况下的单一设备故障除了模拟设备故障时的保护动作跳闸逻辑,还需要模拟开关失灵保护的跳闸逻辑。除此之外,在考虑此故障模式作为动态安全分析预想故障集的一部分时,跳闸时序不同对于动态安全分析的结果也不同,还需要模拟失灵时设备的跳闸时序。

如图 2 所示,A 站开关 5011 处于检修状态。根据故障模式识别的分析结果,设置 B 站Ⅱ母故障,同时 B 站开关 5013 拒动。

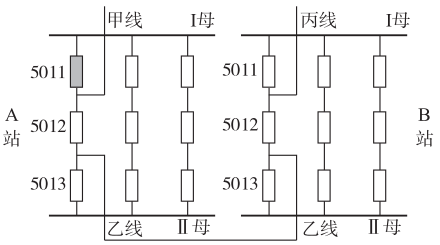

图 2 单开关拒动模式下的设备风险
Fig. 2 Equipment risk with single breaker reject mode

根据保护动作跳闸逻辑,B 站Ⅱ母故障时跳开Ⅱ母所连接的所有开关,由于开关 5013 拒动,开关失灵保护跳闸逻辑启动,跳开 B 站侧开关 5012 并启动远跳,同时,跳开 A 站侧开关 5012 和 5013。根据上述跳闸逻辑,进行网络拓扑分析可得到在母线故障且开关拒动的情况下,会造成甲线和乙线的停运,且甲线和乙线均在故障后 0.2 s(开关失灵保护动作时限)左右才会停运。保护动作逻辑需要模拟

上述保护动作跳闸逻辑，即模拟开关失灵保护跳闸逻辑，以满足暂态安全分析预想故障集对于故障持续时间的需求。

1.3 风险故障集形成

以往的静态安全分析和在线安全稳定分析的预想故障集采用程序自动生成和用户手工定义相结合的方式形成。考虑到组合的维数灾问题，程序自动生成的预想故障集只能到 $N-1$，而不能扩展到 $N-2$及其以上。用户手工定义的预想故障集也是根据离线分析软件计算出的典型 $N-K(K\geqslant 2)$故障模式，并不能随着电网运行方式的变化而动态生成。

通过设备的风险辨识就可以在线识别电网中发生概率较高或对电网冲击较大的 $N-K$ 故障模式，从而有针对性地解决预想故障集从 $N-1$ 到$N-K$ 时带来的组合维数灾问题，显著提高了大电网风险防控的能力。

设备风险故障集结构包括故障集序号、组号、故障设备以及故障持续时间 4 个部分。其中：序号描述故障集的序号；组号描述故障设备所处的故障组；故障设备描述故障设备名称；故障持续时间描述故障的持续时间。

对于静态安全分析只考虑热稳定问题，不需要考虑故障持续时间；而在线安全稳定分析则侧重考虑电网暂态问题，开关拒动情况下每个设备的故障持续时间就需要一并考虑。

2 总体实现

设备风险辨识的总体实现逻辑框图如图 3 所示。

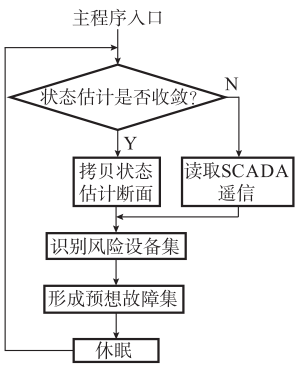

图 3 设备风险总体逻辑框图
Fig. 3 Overall logic diagram of equipment risk

在状态估计计算结果收敛的情况下，定时读取状态估计计算结果断面数据，以获取电网的实时运行方式，可利用状态估计对错误遥信的辨识功能，提高设备风险辨识功能的准确度；在状态估计计算结果不收敛的情况下，直接读取数据采集与监控(SCADA)系统数据的开关位置信息，以获取电网的实时运行方式，确保设备风险辨识功能的稳定性。

在获取当前电网运行方式后，采用网络拓扑分析和保护动作逻辑原理相结合的方法，形成风险设备集，并在此基础上进一步形成静态安全分析和动态安全分析的设备风险预想故障集。

3 应用情况

作为华东电网高级调度中心建设的重要研究课题“多维度电网安全风险防控系统的研究和应用”的子项目[9]，该功能已于 2009 年 5 月在华东电网正式投入运行，2010 年 2 月通过了专家组的项目评审。

该功能投入正式运行后，多次识别到电网中风险较大的运行方式。图 4 所示为华东电网车坊变电站在某个时间段的运行方式。

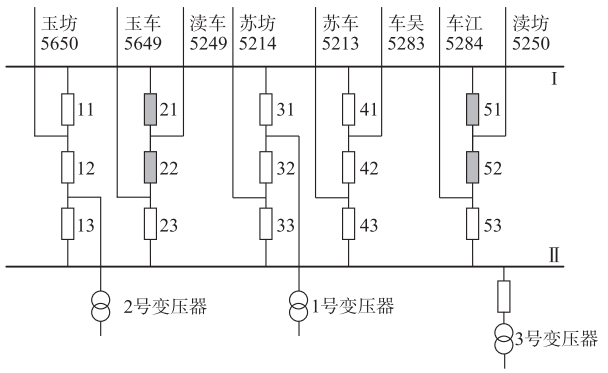

图 4 车坊变电站运行方式图
Fig. 4 Operation mode diagram of Chefang substation

在该运行方式下，若Ⅱ母发生故障跳闸，将会导致玉车 5649 线、车江 5284 线和 3 号主变压器停运，分析结果见附录 A 图 A1。

更为严重的是，若苏车 5213 线故障且开关 5043 拒动，将会导致苏车 5213 线、玉车 5649 线、车江 5284 线和 3 号主变压器这 4 个设备同时停运的严重故障，对电网的安全稳定运行带来了极大的挑战。

除了提供上述基于电网实时运行方式的设备风险辨识预警外，还提供了基于电网某个运行方式下的研究模式，以方便调度员在进行设备检修或运行方式调整时，能够清晰地了解到该操作是否会带来其他运行风险，从而避免由于操作不当给当前电网施加更大的风险。

4 结语

本文提出了一种针对电网 3/2 接线方式下的设备风险在线辨识方法，采用网络拓扑分析和保护动

作逻辑相结合的技术,将设备风险故障模式作为静态安全分析和在线安全稳定分析的预想故障集的一部分,有针对性地解决了预想故障从$N-1$到$N-K$时的组合爆炸问题,提高了电网实时预警的水平。同时,也可作为调度运行人员进行设备检修和运行方式调整时的参考工具,避免由于操作不当给电网施加潜在的风险,提高了电网的可靠性水平。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

参 考 文 献

[1] 贺家李,宋从矩,等.电力系统继电保护原理:增订版[M].北京:中国电力出版社,2004.

[2] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美"8·14"大停电的启示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.

[3] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part two reliable information, quantitative analyses and adaptive controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.

[4] 郭永基.加强电力系统可靠性的研究和应用——北美东部大停电的思考[J].电力系统自动化,2003,27(19):1-5.
GUO Yongji. To focus on improving power system reliability—a pondering over the east North-America major blackout [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 1-5.

[5] 陈亦平,赵曼勇,刘文涛,等.南方电网连锁故障风险分析及防御措施研究[J].南方电网技术,2010,4(3):8-11.
CHEN Yiping, ZHAO Manyong, LIU Wentao, et al. The risk analysis and defensive measures research of cascading failures in China southern power grid [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(3): 8-11.

[6] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2001.

[7] 帅军庆.特大型电网高级调度中心关键技术[M].北京:中国电力出版社,2010.

[8] 王兴,丁建,于尔铿,等.能量管理系统(EMS):第8讲 实时网络状态分析[J].电力系统自动化,1997,21(8):84-87.
WANG Xing, DING Jian, YU Erkeng, et al. Energy management system(EMS): Part eight real time network state analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(8): 84-87.

[9] 张怀宇.华东电网高级调度中心建设研究与实践[J].华东电力,2009,37(6):20-25.
ZHANG Huaiyu. Research and practice of the construction of advanced dispatch center of the East China grid[J]. East China Electric Power, 2009, 37(6): 20-25.

闪 鑫(1980—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:广域测量系统及综合智能报警应用的研发与工程化。E-mail: shanxin@sgepri.sgcc.com.cn

戴则梅(1974—),女,高级工程师,主要研究方向:智能电网和调度自动化。

曹 路(1971—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统运行分析。

An On-line Identification of Equipment Risk for 3/2 Circuit Breaker Connections

SHAN Xin[1], *DAI Zemei*[1], *CAO Lu*[2], *WANG Dexing*[2]

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China;
2. Power Dispatching Center of East China, Shanghai 200002, China)

Abstract: Owing to lots of advantages such as high reliability for power supply, flexible operating and dispatching mechanism and convenient transfer switching, etc, the 3/2 connection mode has been widely put into operation in 500 kV power stations and some 200 kV load-center substations. However, many equipments may be subjected to power cut caused by some fault modes as long as the connection mode is linked with primary equipment or the breaker under prophylactic overhaul. Using on-line identification technology of equipment risk based on network topology analysis and operation logic for protection, it is able to automatically identify the latent fault mode concerning $N-2$ or more power-failure equipments for primary equipment or breaker overhaul under 3/2 connection mode, and reminds relevant dispatching working staff. In the meantime, through the combination of static and dynamic security analysis and maintenance schedule, it will achieve on-line prevention and control mechanism for equipment risk in large power grid.

This work is supported by National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2008BAA13B06).

Key words: equipment risk; risk prevention and control; network topology; protection logic; contingencies

附录 A

图 **A1**　设备风险辨识结果

Fig.A1　Result of equipment risk identification