

# 增强电网安全的思路

邓明燕

(四川电力送变电建设公司, 四川 成都 610051)

**摘要:**世界范围内的多次大面积停电事故越来越引起人们对电网安全稳定的关注。对电网进行实时的稳定评估, 提供紧急控制策略, 实现电网安全稳定性的在线监测和预警是位于“三道防线”之前的一个重要分析工作。随着电力市场改革的深入发展, 如何提高市场环境下大电网的安全性也是需要深入讨论的问题。对电网安全稳定性的在线监测和预警以及市场条件下的处理输电阻塞等两个方面内容进行研究, 为大电网安全防治提供有效的研究思路和初步的解决方案。

**关键词:** 电网安全; 在线安全评估; 输电阻塞

**Abstract:** Several wide-spread power blackouts have drawn the increasing concerns about the security and stability of power grid around the world. Real-time stability assessment of power grid, online monitoring and forewarning which provide emergency control strategy to achieve the security and stability of power grid are an important analysis prior to “three lines of defense”. How to improve the security of whole grid under the electricity market is also an issue that needs a detailed discussion. The researches about online monitoring and forewarning for the security and stability of power grid and dealing with transmission congestion under market conditions are introduced, which provides an effective research idea and a preliminary solution for the security control of whole power grid.

**Key words:** security of power grid; online security assessment; transmission congestion

**中图分类号:** TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)02-0049-04

## 0 引言

电力系统安全稳定运行与国家安全、社会稳定有着重要的联系, 特别是近几年来, 电网发生大的安全稳定事故, 冲击社会稳定、经济发展, 2003 年美加大停电、2006 年欧洲互联电网大停电等给人们敲响了警钟。随着电力系统远距离、大容量联网运行, 电力系统事故防治需要在技术经济层面上重视对供发输配各环节的规划和监控。

电力系统薄弱环节的识别和监控是位于“三道防线”之前的一个重要分析工作, 目前在线或是离线训练在线判别是有效识别和监控电力系统薄弱环节的重要方式; 在日益放松管制的电力市场环境下也应实现经济性与安全性的配合, 以防止电网大规模停电事故的发生。

下面主要研究电网提供紧急控制策略实现电网安全稳定性的在线监测和预警, 市场条件下的处理输电阻塞等两个方面内容, 为大电网安全防治提供有效的研究思路和初步的解决方案。

## 1 在线稳定评估和故障预防

电网安全运行必须坚持“安全第一, 预防为主, 综合治理”的方针, 因此有必要使电网时刻在稳定水平较高的状态下运行, 为达此目的, 必须对电网进行实时的稳定评估, 掌握不同运行状态下电网的稳定水平和电网存在的潜在问题, 并确定具体的预防控制策略, 为运行调度人员通过合理地改变运行方式来提高电网的稳定级别, 提供直接的理论依据。

目前为止, 安全评估方法主要可以归为 2 大类, 一类是基于数学模型的安全评估方法, 另一类是基于人工智能理论的安全评估方法。

### 1.1 基于数学模型的安全评估

基于数学模型的安全评估方法包括时域仿真法和基于 Lyapunov 函数的能量函数法 (直接法)。其中前者是目前为止电力系统安全评估中的最成熟、计算精度最高的方法。但是在计算系统的临界切除时间 (critical clearing time CCT) 时却需要反复的凑试, 计算时间较长, 无法满足在线稳定评估对速度的要求。

并且,时域仿真法最大的缺点还在于该方法只能判别系统在固定扰动下是否处于稳定状况,而不能为调度人员提供如何提高系统稳定水平的决策依据。

后者将扰动后的系统看做初态下的自治系统来研究其稳定性,使时域仿真的计算时间缩短到扰动停止时刻,大大加快了安全判别速度。但直接法也存在难以克服的缺陷,如对复杂系统模型缺乏有效的能量函数构造方法,且 Lyapunov 定理本身只能提供稳定的充分条件,而不是必要条件等,降低了其稳定评估结果的准确性<sup>[1]</sup>。

基于数学模型的安全评估方法始终需要一定的时域仿真过程,计算速度很大程度上受制于系统规模。它需要针对预定的测试故障集逐一判断稳定性,难于对给定的运行方式下电网的稳定水平进行判别,人工智能技术在安全评估中的应用可望在这一方面做出补充和支撑<sup>[2]</sup>。

### 1.2 基于人工智能的安全评估

SCADA 系统采集到运行数据的日益丰富和完善为人工智能在电力系统安全评估中的应用提供了前提条件。基于人工智能的安全评估方法的本质是建立特征变量和安全结果之间的映射关系,构造电力系统状态的快速分类器。它通过在离线的情况下进行大量的知识学习,训练一个稳定评估分类器,并生成评估稳定水平的判据,最终用生成的判据对电力系统的稳定水平进行在线评估。

人工智能型安全评估方法主要有两个关键步骤:一是选择能描述稳定水平的关键特征子集;二是稳定评估知识的获取和稳定判别规则的生成。最终将生成的规则应用于在线稳定水平的判别。

#### 1.2.1 人工智能型安全评估流程

人工智能型安全评估过程具有如图 1 示的层次型结构。

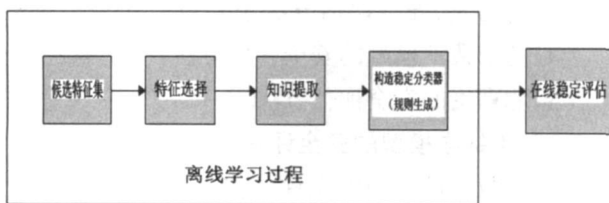


图 1 在线稳定评估流程图

#### 1.2.2 候选特征集的抽取和特征选择

输入特征的选择是基于人工智能理论的稳定评估精度和速度的一个关键过程。就输入特征选取来说,有些学者直接根据经验指定分类器的输入特征子

集<sup>[3]</sup>,但是电力系统是一个典型的非线性系统,特征维数与规模成比例增长,光凭经验难于选择最能描述稳定水平的特征,从而导致稳定评估精确度不高;目前,大多数学者则采用优化组合方法从候选特征集中选择最能描述稳定水平的特征子集。

在进行特征子集的提取之前,首先要选取一个初始的候选特征集。目前,在候选特征集的选择上有两类<sup>[4]</sup>。一类是电网受扰后的动态参数构成的候选特征集。该类候选特征具有独立于网络拓扑、扰动形式和扰动地点的优点,但其不能指出运行方式中的哪些因素影响了稳定水平,以及如何调整潮流分布有助于改善稳定水平。另一类是以稳态潮流量构成的候选特征。与采用动态参数作候选特征相比,该类候选特征集具有能提供应监视的重点信息、能提供有效的预防控制对策等优点。

一般说来,初始候选特征集的抽取阶段,为了确保提供足够的分类信息,原始特征数目一般比较多,维数也很高,其中不可避免地存在大量不相关或者冗余信息。如何从原始特征集中剔除冗余信息,挑选出一组最有效的特征,以达到降低特征空间维数,确保分类能力,就是特征选择所需要解决的问题。

特征选择就是从 D 维原始候选特征集中选取 d (d < D) 维最有利于稳定判别的特征子集。特征选择的目的是有两个:过滤和稳定评估无关的特征以及去除和其他特征强关联的特征,最终得到的是和稳定强相关而彼此不关联的最优特征子集。目前已有大量的特征选择算法,例如贪婪式的前向选择方法<sup>[5]</sup>、主成分分析法<sup>[6]</sup>以及模拟进化类方法,如遗传算法<sup>[7-8]</sup>等,并取得了一定的效果。

#### 1.2.3 稳定评估知识的获取和稳定判别规则生成

稳定评估知识的提取就是通过对大量的样本进行分析学习,从中获取样本在特征空间的分类规律,文献 [8] 通过递归切割的模式发现算法从样本空间获取了样本的类分布规律,文献 [9] 构造支持向量机 (support vector machine SVM) 划分系统是否稳定的最优分界超平面和临界样本。

在获取稳定评估知识之后,需要构造一个稳定评估分类器,生成可解释性强,为运行调度人员实施决策提供直接依据的稳定判别规则,最终利用生成的规则对电力系统在线评估。在稳定评估分类器的设计方面,人工神经网络、机器学习、模式识别以及决策树等都被应用到电力系统安全评估分类器的设计上。

文献 [8] 应用决策树将经过模式发现获取的类分布知识生成产生式稳定评估规则, 所获得的规则对稳定判别具有极高的置信度。

### 1.3 在线稳定评估

人工智能型安全评估方法之所以具有极高的评估速度是因为稳定判别规则是离线生成的, 且不需要重复训练。一旦规则生成, 就能将规则应用于在线评估。调度运行人员只需要重点监视特征选择结果中的几个极少的运行特征量, 将各个运行量的大小和规则中的特征量的大小进行匹配, 即能快速判别系统的稳定水平。

### 1.4 智能型安全评估方法需要解决的问题

虽然人工智能型安全评估方法具有评估速度快、易生成决策式的稳定评估规则等优点, 但由于该类方法处于探索阶段, 需要处理好以下几个关键问题。

1) 样本生成方面: 由于智能型方法是基于样本的学习方法, 生成的规则是从有限样本中获取的, 因此样本的生成直接影响规则的置信度。在样本生成过程中, 要尽量保证样本包含各种可能的运行方式。

2) 特征选取方面: 预防控制的主要措施在于调节发电机出力和改变潮流等方法, 因此用潮流量作为候选特征是最理想的选择。但是该类特征量的维数随电网规模的增加而急剧增加, 从而导致特征选择过程计算量的巨大增加, 因此, 如何选择候选特征集也是一个待解决的问题。

3) 知识获取方法方面: 规则的生成直接取决于知识获取所得的结果。现有的 SVM 和模式发现算法等方法都不够理想。其中 SVM 所得到超平面只能判别系统是否稳定, 而无法获得规则; 模式发现算法对样本空间非常敏感, 且事件之间的边界难于确定, 这些都直接影响了所生成规则的置信度。

## 2 市场环境下的电网安全

市场环境下电力系统的电源规划、输电规划、可靠性评估、电力调度、有功无功和输电系统运行备用等方面都与传统垂直调度管理的电力系统有很大的不同。而市场环境下直接影响电网安全的重要环节则是输电阻塞, 以及由此引发的连锁事故。美国几次大停电都是由于线路过载导线过热, 弧垂增大引起接地造成的; 欧洲大停电中因为在 Wehrendorf 至 Landesbergen 线路过载导致保护动作, 从而引发一系列连

锁反应, 造成事故范围的扩大。

阻塞及阻塞管理是输电可靠性及其控制概念在电力市场环境下的延伸。市场环境下发电商、供电商、用户的高度独立和自由交易可能产生大规模的远距离输电交易, 这将频繁改变系统的运行状态, 导致潮流的不确定性加剧。例如欧洲电网实行能源市场自由化后, 使得葡萄牙从乌克兰购入电力能源成为可能, 这个几乎跨越整个西欧大陆的电能传输经常会导致线路过载。缓解电力网络的阻塞是保证电力市场环境下电力系统安全运行的关键, 无论从缓解手段、预防策略及分析方法上都进行了很多的研究<sup>[10-13]</sup>。

系统运行人员为消除输电网络阻塞, 既可以通过调整工况或发布可用传输容量 (ATC) 等信息来引导市场参与者, 也可以通过需求侧管理在时间和空间上转移负荷, 建立可中断负荷市场或引入可交易输电权来缓解输电阻塞, 在必要时强制性地调整交易或“市场分裂”以消除阻塞。

从长远看消除阻塞的手段主要是改善网络结构, 包括建设新线、配置 FACTS 等, 以提高传输容量极限。输电规划应将安全性与经济性统一成货币以量化系统的安全风险水平<sup>[14]</sup>。消除短期阻塞的手段包括调整网络结构和控制器参数, 调节变压器抽头、移相器、FACTS 装置等, 在不改变市场交易的情况下提高输电极限, 使考虑阻塞费用后的潮流达到最优<sup>[13]</sup>。当上述手段无法消除运行阻塞时, 市场交易受到限制, 只能基于市场机制来调整或削减发电计划。若能给出正确的市场信号, 电网投资者将受到激励。因此, 在增加网络投资与调整发电计划这两类措施之间存在较强的协调互补性。

关于输电阻塞管理的新进展, 更多的是关注动态阻塞及其风险决策问题, 以及考虑各种安全稳定约束的阻塞管理, 包括电压安全。阻塞管理还涉及电力市场风险和电力系统稳定性这两者的交互影响, 因为物理系统的输电极限问题不再是单纯的技术问题, 需要在稳定控制中考虑阻塞管理的可行性<sup>[12]</sup>。另外可鼓励可中断负荷参与阻塞管理, 建立完备的可中断负荷市场。在统一的框架中研究电力系统稳定控制与电力市场阻塞管理是值得关注的动态之一。

## 3 结 论

前面在研究电网安全分析的前提下, 主要针对在

线稳定评估、市场环境下的输电阻塞问题进行研究并提出初步的解决思路。

基于人工智能的在线稳定评估方法具有在线评估速度快、生成的规则解释性强等优点。新方法可以提供运行调度人员重点监视的潮流量,根据潮流量的大小实时地掌握当前运行方式下电网的稳定水平,生成的规则可以为运行调度人员通过改变运行方式来提高系统的稳定性提供直接的理论依据,但由于该方法还只处于探索起步阶段,仍存在大量技术问题亟待解决。

指出输电阻塞是影响市场环境下电网安全的重要环节,如何完善相关的市场机制,使得电力市场的设计和运行能为电网安全提供更可靠的保障。

### 参考文献

[1] 管霖,曹绍杰.基于人工智能的大系统分层在线暂态稳定评估[J].电力系统自动化,2000,24(21):23-26.

[2] 管霖,王同文,唐宗顺.电网安全监测的智能化关键特征识别及稳定分区算法[J].电力系统自动化,2006,30(21):22-27.

[3] 李军,刘艳,顾雪平.基于信息熵的属性离散化算法在暂态稳定评估中的应用[J].电力系统自动化,2005,29(8):26-31.

[4] 王同文,管霖,章小强,等.基于扩展 k 阶近邻法的电力系统稳定评估新算法[J].电力系统自动化,2008,32

(3):18-21.

[5] 王皓,孙宏斌,张伯明,等.基于混合互信息的特征选择方法及其在静态电压稳定评估中的应用[J].中国电机工程学报,2006,26(7):77-81.

[6] 于之虹,郭志忠.改进主成分分析法用于暂态稳定评估的输入特征选择[J].电力系统自动化设备,2003,23(8):17-21.

[7] 于之虹,郭志忠.遗传算法在暂态稳定评估输入特征选择中的应用[J].继电器,2004,32(1):16-20.

[8] 王同文,管霖.基于模式发现的电力系统稳定评估和规则提取[J].中国电机工程学报,2007,27(19):25-31.

[9] 许涛,贺仁睦,王鹏,等.基于统计学习理论的电力系统暂态稳定评估[J].中国电机工程学报,2003,23(11):51-55.

[10] 冯天晶,杨光.电力市场的输电阻塞管理方案研究[J].高电压技术,2006,32(10):106-108.

[11] 马进,宋永华,卢强,等.开放电力市场环境下的动态阻塞管理[J].电力系统自动化,2004,28(10):23-28.

[12] 彭慧敏,薛禹胜,许剑冰.关于输电阻塞及其管理的评述[J].电力系统自动化,2007,31(13):101-107.

[13] 柯进,管霖.电力市场下的输电阻塞管理技术[J].电力系统自动化,2002,26(14):20-25.

[14] 麻常辉,薛禹胜,鲁庭瑞,等.输电规划方法的评述[J].电力系统自动化,2006,30(12):97-101.

(收稿日期:2009-12-20)

(上接第 33 页)

### 3 结语

分布式发电并网运行是智能电网发展的必然趋势。正确考虑不同分布式电源的可靠性模型,合理地分布式电源选址定容,可以有效地提高配电网供电可靠性,从而保证分布式发电与传统发电相结合的配电网健康有序的运行与发展。

以上采用了区间算法对配电网在元件及负荷原始参数不确定因素时进行了可靠性评估,使得计算结果更接近工程实际。

### 参考文献

[1] Mukesh Nagpal, Frank Phlips, Richard Fulton, et al. Dispersed Generation Interconnection Utility Perspective [J]. IEEE Transactions on Industry Applications Vol 42, No. 3, May/June 2006.

[2] 钱科军,袁越, ZHOU Cheng-ke 等.分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J].电网技术,2008,32(11):74-78.

[3] 王赛一.分布式电源对配电系统的影响[J].上海电力,2006,19(5):515-518.

[4] 张鹏,王守相.大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J].中国电机工程学报,2004,24(3):79-84.

[5] 易新,陆于平.分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J].电网技术,2006,30(7):50-54.

[6] 王守相,王成山.现代配电系统分析[M].北京:高等教育出版社,2007.

[7] 郭永基.电力系统可靠性分析[M].北京:清华大学出版社,2003.

[8] Allan R N, Billinton R. A Reliability Test System for Educational Purposes - Basic Distribution System Data and Results [J]. IEEE Trans on Power Systems 1991, 6(2): 813-821.

[9] 施伟国,宋平,刘传铨.计及分布式电源的配电网供电可靠性研究[J].华东电力,2007,35(7):37-41.

(收稿日期:2009-08-02)