

分布式能源系统故障诊断与预测专家 知识库研究与应用技术综述

吕楠,章筠,陈尚文

(上海电气中央研究院,上海 200070)

摘要: 故障诊断与预测是保障分布式能源系统可靠安全运行的重要技术手段,是分布式能源系统推广应用所不可缺少的技术基础。以“分布式能源系统故障诊断与预测专家知识库”为主题,结合故障诊断与预测技术的国内外研究现状,综述并分析了分布式能源系统故障诊断与预测技术的研究与应用现状以及发展趋势。同时,分析了专家系统故障诊断理论在知识获取和构造方面的固有缺陷。

关键词: 分布式能源系统;故障诊断;故障预测;专家系统

The Research and Application Overview of the Distributed Energy Systems Fault Diagnosis and Forecasting Expert Knowledge Base

LV Nan,ZHANG Jun,CHEN Shang-wen

(Central Research Institute of Shanghai Electric Group Limited by Shene Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Fault diagnosis and prediction are the important technical mean to ensure the distributed energy systems' operation safety, and it's an indispensable technical foundation for distributed energy system popularizing. Taking "Distributed energy system fault diagnosis and forecasting expert knowledge base" as the topic, combined with the research status of the fault diagnosis and prediction technology at home and abroad, this paper reviews and analyses the research and application status and development trend of distributed energy system fault diagnosis and prediction technology. At the same time, this paper analyse the theory inherent defects of expert system for fault diagnosis in knowledge acquisition and structural aspects.

Key words: distributed energy system; fault diagnosis; fault prediction; expert system

0 引言

近年来,在能源短缺和环境污染的大背景下,分布式发电技术得到了迅速发展,分布式能源系统的故障诊断及预测技术也得到了广泛关注。如何迅速、准确地判断电网是否发生故障、定位故障发生位置以及识别故障发生的程度,甚至对即将发生的故障进行预测,对于排查电网故障、恢复供电、保障社会经济健康持续发展有着极其重要的现实意义^[1-4]。一方面,它能缩短故障应急处理时间,减少故障所导致的损失;另一方面,它能为系统维护计划制定和备品备件管理提供必要的参考。故障诊断及预测的主要方法有基于机理的方法、基于数据分析的方法和基于人工智能的方法。其中,基于知识库的故障诊断及预测专家系统,具有智能性、开放性和易扩展性等优点,是提高分布式能源系统运行安全性和可靠性的有效工具,具有较高的应用价值^[5-6]。

1 电网故障诊断与预测研究现状

目前,电网故障诊断与预测方法主要分成两大类:基于模型的方法和数据驱动的方法。

基于模型的故障诊断方法又可以分为基于定量模型故障诊断方法和基于定性模型故障诊断方法。基于定量模型故障诊断方法依赖于对电网系统的数学描述,随着物理模型复杂程度的增加,其数学描述的难度也急剧增大^[7]。基于定量模型故障诊断方法还可以分

成详细物理模型方法和简化物理模型方法。在详细物理模型方法中,需要得到在正常模式和故障模式下,所有元件的特性和物理相关性。它能比其他故障诊断方法获得更好的细节信息,但是具有极大的计算复杂度。而简化物理模型方法则是通过一些假设来简化物理过程中的微分方程^[8]。基于定性模型故障诊断方法则是通过过程的启发式症状,而非精确的数学描述来确定电网系统的状态。该方法能够比基于定量模型的故障诊断方法更加鲁棒。这种方法通过专家系统或者故障树进行推理,从而进行电网的故障诊断。

数据驱动的故障诊断方法不需要知道电网的物理模型,它基于大量输入输出数据,尝试从数据中找到一个函数来描述输入输出之间的关系。在文献中,常用的数据驱动故障诊断方法包括:基于人工神经网络的故障诊断方法^[9-12]、基于 Petri 网的故障诊断方法^[13-16]、基于贝叶斯网络的故障诊断方法^[17-19]和基于模糊集理论的故障诊断方法^[20-23]。

2 分布式能源系统故障诊断与预测专家知识库研究现状

在电力系统的故障诊断与预测中,典型的专家知识库系统应用基于产生式规则,所谓产生式规则就是用规则表示保护器件、断路器器件的动作逻辑以及运行人员的诊断经验,从而建立用于故障诊断和预测知识库。获取系统状态信息后,专家知识库系统根据规则进行推理,进而获得故障诊断的结果。直观性、实时性和有效性使得专家知识库系统能够在一定程度上解决一些不确定性问题;符合人类语言习惯的解释能力和

收稿日期:2015-10-11

作者简介:吕楠,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化。

结论描述使其得到广泛应用。

基于专家知识库的电力系统故障诊断与预测理论经过几十年的研究发展历程在业务知识获取和构造方面取得了长足进步,然而,专家知识库系统进行故障诊断或预测的基本原理没有改变。至今,其固有缺陷在实际应用中仍不能忽视:(1)知识获取难。对不同的业务,知识的获取完全依赖人工移植,因此,完备的业务知识库的获取是故障诊断与预测专家系统的瓶颈问题;(2)系统维护难。由于系统本身的不完备性、故障事件的不确定性存在,知识库要经常进行相应的维护,而这个工作量是极大的;(3)容错能力较差。实际应用中一旦出现知识库没有涵盖故障情况,系统通常会出现误诊。目前还没有专门针对分布式能源系统故障诊断与预测的专家系统,但是从现有的电力系统故障诊断与预测系统中可以窥见一斑。

2.1 基于正反向推理的电力系统故障诊断专家系统

文献[24]提出了基于正、反向推理的电力系统故障诊断专家系统。系统在进行故障推理前,电网断路器、隔离开关位置状态数据库和结构数据库会被读取,电网将被表示成由节点和支路构成的图。电力系统中的母线、变压器、线路和发电机等电气设备表示为节点,断路器为支路。如此,断路器与设备的关系便可一目了然。当故障发生而引起断路器跳闸时,推理系统被激活进行推理。

2.2 新型电网故障诊断专家系统的设计

文献[25]研究了一种基于实时动作信息的故障诊断专家知识库系统,该系统充分利用故障信息,综合波形分析工具数据,旨在将基于进化算法的优化算法融入故障诊断系统的推理过程中,针对实际故障的复杂性,建立一种全新的用于故障诊断的推理优化算法。该优化算法基于专家知识库,结合严密的推理、分析可得到更准确可信的设备故障信息,同时,该算法还能得到保护动作和断路器的诊断结论,如此,使得优化后的算法的适应性足以和专家系统媲美。

2.3 继电保护专家系统

继电保护专家整定系统主要实现电网在不同运行方式下,能够快速准确地自动全部继电保护设备的整定值,并且能够根据要求,编排出最优的定值运行方案系统。该系统的最重要功能特点是能自己适应不同的运行方式要求,自动计算定值,并制定运行方案。该系统能将以前需要继电保护整定人员花数十小时才能运算、确定的定制方案,经过专家系统数分钟的计算便能得到最优的结果。特别是对于大电网、大系统的交直流混联的系统,能够快速实现零序电流、相间距离和接地距离、低电压等保护定值的快速实现,实现的过程全部通过专家系统实现,必能通过通信系统迅速将相关定值植入系统,提高维护的准确性和效率^[26-27]。

2.4 智能告警专家系统

电网报警系统可以根据电网的各种遥信信息,诊断出电网运行状态的改变,进而将可能存在的异常或故障提示呈现给操作人员,使电网运行中存在的问题得以及时发现,从而保障电网的安全运行。目前,国内外对于电网报警信息的处理方式主要有:汇总显示

和光字牌的显示,报警信息将被逐个上传并显示给调度人员。但是,这种报警信息处理方式致使报警信息之间的耦合被无形忽略,无法将结论性的报警条文呈现给调度运行人员,缺乏针对性且效率很低^[28,29]。

2.5 电压-无功控制专家系统

电压-无功控制是基于控制手段保证电力系统运行安全性的方式。它主要有两个方面:第一,预防控制越限,这属于预防控制的范畴;第二,当越限出现时,电压-无功控制采取措施使电力系统得以恢复正常状态(即校正控制)。从本质来看,这两方面求解的方法是相同的,只是侧重点略有不同。

电压-无功控制专家系统由于其良好应用前景,受到各国专家的重视。在国外,由美国华盛顿大学开发的专家系统VCES已经成功地在实际应用中暂露头角。在国内,上海交通大学、东南大学、华北电力大学等高校也已经研发出一些用于电压-无功控制专家系统的原型,并在实际应用中得到检验,为今后的进一步完善和实用化奠定了基础^[30-32]。

2.6 其他专家系统

文献[33]和[34]介绍了电力负荷预测专家系统,将专家系统应用于电力负荷预测,即通过分析过去几年至几十年内每小时的负荷及天气等方面的数据,汇聚有负荷预测经验的专家的知识,制定相关规则,并按照此规则进行负荷预测。文献[35]和[36]介绍了专家系统在电能质量监测管理方面的应用,电能质量的优劣关系到发电、供电、用户各方的权益。文献[37]和[38]介绍了专家系统在电网检修计划编制中的应用。文献[39]介绍了专家系统在电力系统短期负荷预测方面的应用,短期负荷预测精度直接影响电力系统运行的安全性、经济性和供电质量。文献[40]介绍了专家系统在电力系统结构恢复中的应用。大的扰动或故障会引起电力系统发生大面积停电事故,所谓电力系统恢复,就是指通过电力系统机组的自启动、邻近电网的支援,促使系统内部相关运行元件及供电性能逐步恢复到正常运行状态的过程。

3 分布式能源系统故障诊断与预测的发展趋势

3.1 系统层故障诊断与预测研究现状及发展趋势

分布式能源系统在系统层面上故障机理复杂,故障预测非常困难,目前相关研究文献缺乏^[41]。电力系统故障预测的难度主要有三方面原因,一是电网系统自身结构复杂,故障的原因和类型繁多;二是预测故障需要大量相应的状态监测数据,而目前能够获取的数据尚局限于加装在变压器、断路器等系统元件上的在线监测装置;三是配电网潜隐故障征兆信息微弱且存在不确定性。因此,目前基本没有文献讨论电网系统层的故障预测问题。然而,电网系统层的故障预测又十分重要,能在电网发生严重故障前实现可靠地预测,将有利于电网系统的调度,尽可能地降低生命财产损失。因此,未来可以从三种不同的方法开展电网系统层的故障预测研究:(1)基于故障物理模型的故障预测,通过对电网物理模型的调研,利用数学工具描述电网的物理模型,然后在此基础上进行故障预测;(2)基

于数据驱动的故障预测,利用专家系统、神经网络等进行故障预测;(3)基于统计可靠性的故障预测,利用灰色预测模型、马尔科夫预测模型或者贝叶斯网络等进行故障预测^[42]。

3.2 设备层故障诊断与预测研究现状及发展趋势

目前的分布式能源系统设备故障预测研究,主要针对储能装置及功率器件。其中,储能装置的故障预测主要针对电池、电容器及超级电容等;功率器件的故障预测主要针对功率开关、被动元器件、控制器及门驱动等。储能装置电池的故障预测,通过建立电池的SOC模型,利用粒子滤波算法估计电池的剩余寿命,进而实现故障预测。功率器件的故障预测目的是预测功率电子设备的异常操作。

目前关于分布式能源系统设备故障预测的文章研究较少。实际工况下,风电机组运行环境极为复杂,很难用模拟的办法构造实际运行状态,同时,我国缺乏大功率风电机组的试验数据,风电机组运行状态预测(故障预测)和异常识别,是我国风电机组控制系统在线监测信息挖掘和风力发电技术发展迫切需要研究的重要课题^[43]。与传统发电机组不同,对于风电机组的控制系统,实时监测电网、风况和机组的运行参数,监测各个部件的运行工况和环境变化情况都是必须的。因此,实时在线监测信息量极大,各个特征量之间的耦合不可避免。鉴于风电机组各个部件的特征量具有明显的动态性、相关性、波动性和随机性,如何充分利用机组的在线监测信息,开展风电机组运行状态趋势预测基础理论研究,识别机组异常运行状态,具有重要的学术研究价值。

4 总 结

随着新能源技术的发展,分布式能源系统具有良好的应用前景。从分布式能源系统故障诊断与预测技术的研究与应用现状来看,由于分布式能源系统研究的历史较短,其运行方式也同传统电网有一定的区别,故障机理尚未研究透彻,因此直接针对分布式能源系统应用的故障诊断方法较少,故障预测方法更加缺乏。为此,不少研究借鉴了传统电网故障诊断方法,加以改进以适应分布式能源系统应用的需要。鉴于分布式能源系统故障诊断和预测的重要性,该领域也成为了目前学术界和工业界关注的热点,相关技术还在发展。在传统电力系统故障诊断方面,专家系统已有不少应用,但针对分布式能源系统故障诊断的研究尚未成熟,实际应用也比较缺乏。专家系统具有开放、易扩展等优点,适宜于充当现阶段分布式能源系统故障诊断与预测技术的实现工具,也易于将来故障诊断与预测系统的维护与改进,是一种较理想的技术支持工具。

参考文献:

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
- [2] 时珊珊,鲁宗相,周双喜,等.中国微电网的特点和发展方向[J].中国电力,2009,(7):21-25.
- [3] 郑漳华,艾芊.微电网的研究现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2008,32(16):27-31.
- [4] Thomson M, Infield D G. Network power flow analysis

- for a high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1157-1162.
- [5] Giraud F, Salameh Z M. Steady-state performance of a grid-connected rooftop hybrid wind-photovoltaic power system with battery storage[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2001, 16(1): 1-7.
- [6] 林圣,何正友,钱清泉.输电网故障诊断方法综述与发展趋势[J].电力系统保护与控制,2010,(4):140-150.
- [7] Katipamula S, Brambley M R. Review article: methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-a review, Part I[J]. HVAC&R Research, 2005, 11(1): 3-25.
- [8] Isermann R. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods-an introduction[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 639-652.
- [9] 毕天姝,严正,文福拴,等.基于径向基函数神经网络的在线分布式故障诊断系统[J].电网技术,2001,25(11):27-34.
- [10] 廖志伟,叶青华,王钢,等.基于GRNN的多故障自适应电力系统故障诊断[J].华南理工大学学报,2005,33(9):6-10.
- [11] Silva K M, Souza B A, Brito N S D, et al. Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 2058-2063.
- [12] 杨光亮,乐全明,郁惟镗,等.基于小波神经网络和故障录波数据的电网故障类型识别[J].中国电机工程学报,2006,26(10):99-103.
- [13] El-Fergany A A, Yousef M T, El-Alaily A A. Fault Diagnosis of Power Systems Using Binary Information of Breakers and Relays Through DPNs[C]. Proceedings of International Conference on Power System Tech, 2002: 1122-1126.
- [14] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power Systems Fault Diagnosis Using Petri Nets[J]. IEEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(3): 231-236.
- [15] 毕天姝,杨春发,黄少锋,等.基于改进Petri网模型的电网故障诊断方法[J].电网技术,2005,29(21):52-56.
- [16] 孙静,秦世引,宋永华.一种基于Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J].电力系统自动化,2003,27(13):10-15.
- [17] Chien C, Chen S, Lin Y. Using Bayesian Network for Fault Location on Distribution Feeder[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(13): 785-793.
- [18] Wang Y, Geng L. Bayesian Network Based Fault Section Estimation in Power Systems[C]. Proceedings of TENCON IEEE, 2006, 1-4.
- [19] 吴欣,郭创新.基于贝叶斯网络的电力系统故障诊断方法[J].电力系统及其自动化学报,2005,17(4):11-15.
- [20] Chin H-C. Fault Section Diagnosis of Power System Using Fuzzy Logic[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 245-250.
- [21] Min S-W, Sohn J-M, Park J-K, et al. Adaptive Fault Section Estimation Using Matrix Representation with Fuzzy Relations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 19(2): 842-848.

(下转第63页)

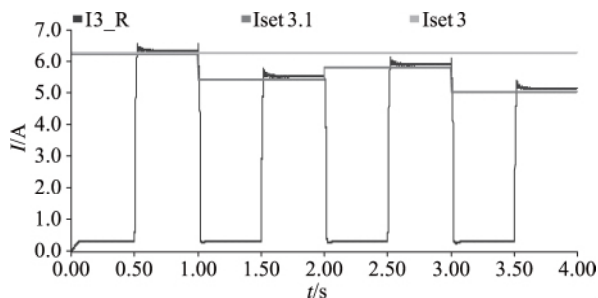


图3 线路4的50%处电流整定值与实测值比较图

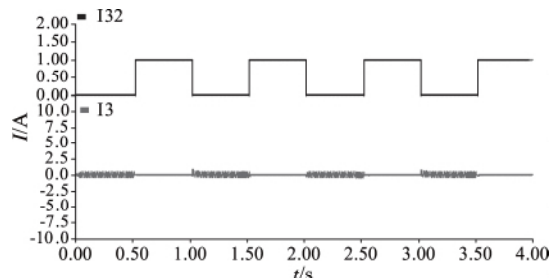


图4 发生故障时断路器动作情况

说明:故障分别发生0.5 s, 1.5 s, 2.5 s, 3.5 s, 且为永久性故障, 仿真时间为4 s。

由图3至图4可得出:采取自适应电流保护时,最小保护范围达到全长的51.91%,且断路器均可靠动作。由于传统电流保护的整定值 I_{set3} 是离线整定的, 保持不变;然而自适应电流保护的整定值 $I_{set3.1}$ 因运行

方式、故障类型而自动调整。因此自适应电流保护的
保护范围将不受运行方式、故障类型的影响,其保护性
能将会有所改善。

4 结 论

本文通过分析 DG 接入配网后对传统保护的影响,提出一种配电网自适应保护方法,对配网进行重新
整定,并利用 PSCAD 进行仿真验证。结果表明在系
统运行方式、故障类型改变的情况下,实时整定各线路
上的保护定值,实现线路保护定值的实时整定,对比离
线整定的保护定值更能适应配网的变化。

参考文献:

- [1] 张青杰,陆于平. 基于故障相关区域自适应划分的分布式
保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 39-43.
- [2] 林 霞,陆于平,王联合,等. 含分布式电源的配电网智能
电流保护策略[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 82-89.
- [3] 温阳东,王 欣. 分布式发电对配电网继电保护的影响
[J]. 继电器, 2008, 24(7): 12-14.
- [4] 庞建业,夏晓宾,房 牧. 分布式发电对配电网继电保护
的影响[J]. 继电器, 2007, 35(11): 5-8.
- [5] 周 卫,张 尧,夏成军,等. 分布式发电对配电网继电保
护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 1-5.

(上接第54页)

- [22] Monsef H, Ranjbar A M, Jadid S. Fuzzy Rule-based Ex-
pert System for Power System Fault Diagnosis[J]. IEE
Proceedings: Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(2):
186-192.
- [23] Cardoso G Jr, Rolim J G, Zurn H H. Interpretation of
Remote Backup Protection Operation for Fault Section
Estimation by A Fuzzy Expert System[C]. IEEE Power
Tech Conference Proceedings, 2003.
- [24] 杜 一, 张沛超, 郁惟镛. 基于事例和规则混合推理的
变电站故障诊断系统[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 34-
37.
- [25] 周 昕, 殷芸辉. 新型电网故障诊断专家系统的设计
[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(3): 15-17.
- [26] 张俊岭. 继电保护定值专家整定系统的研究[J]. 黑龙江
科技信息, 2013, (30): 118-119.
- [27] 张 强. 继电保护故障专家系统研究[J]. 低压电器,
2006, (3): 24-28.
- [28] 晁 进, 刘文颖. 基于多智能体和专家系统的电网智能
报警系统研究[J]. 现代电力, 2010, 27(5): 1-5.
- [29] 王 强, 王 超, 刘远龙. 青岛电网智能告警专家系统
应用分析[J]. 能源技术经济, 2011, 23(5): 14-17.
- [30] 王玉婷. 专家系统在电力系统中的应用研究[J]. 中国电
力教育(下), 2013, (9): 185-186.
- [31] 王振江. 专家系统及其在电力系统中的应用介绍[J]. 广
东输电与变电技术, 2004, (1): 15-19.
- [32] 张勇军, 任 震, 李邦峰. 电力系统无功优化调度研究
综述[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 50-56.
- [33] Rahman S, Bhatnagar R. An expert system based algo-

rithm for short term load forecast[J]. IEEE Transactions
on Power System, 1988, 3(2): 392-399.

- [34] 杜 一, 张沛超, 郁惟镛. 基于事例和规则混合推理的
变电站故障诊断系统[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 34-
37.
- [35] 刘 路, 宁文辉, 陈卫东, 等. 基于 GIS 和专家系统的电
能质量监测 WEB 系统[J]. 广西电力, 2013, 35(6): 7-
9.
- [36] 欧阳森, 王建华, 宋政湘, 等. 一种基于 dq0 变换和专家
系统的电能质量信号辨识方法[J]. 电力系统及其自动化
学报, 2003, 15(5): 21-24.
- [37] 程 丽, 缪相林, 张培海, 等. 基于专家系统编排电网设
备检修计划的求解策略[J]. 河北工业大学学报, 2006,
35(3): 63-67.
- [38] 张小敏, 王维洲, 梁 峰, 等. 专家系统技术在地区电网
检修计划编制中的应用[J]. 电工电能新技术, 2012, 31
(1): 92-96.
- [39] 廖旋焕, 胡智宏, 马莹莹, 等. 电力系统短期负荷预测方
法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 147-
152.
- [40] 徐 升, 房鑫炎. 专家系统在电力系统结构恢复中的应
用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 33-35.
- [41] 陈哲星, 宋 玮, 董 卓, 等. 电网故障序列预测[J].
河北工业科技, 2010, 27(6): 471-472.
- [42] 王瑞芳, 刘 林, 邱继红. 基于 SPC 的电源故障预测系
统研究[J]. 微计算机信息, 2009, (13): 131-133.
- [43] 李学伟. 基于数据挖掘的风电机组状态预测及变桨系统
异常识别[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.