智能配电网自愈控制技术研究与应用

智能配电网自愈控制是在配电网不同层次和区域内实施充分协调并优化的控制策略，使其具有自我感知、自我诊断、自我决策和自我恢复的能力，实现配电网在不同状态下的安全、可靠与经济运行。对国家“863计划”课题“智能配电网自愈控制技术研究与开发”的主要研究内容、成果及示范应用情况进行了重点介绍。课题系统性地提出了智能配电网自愈控制理论和控制策略，研制了智能配电网自愈控制统一支撑平台与自愈控制系统，以及保护测控一体化终端和故障定位指示装置。以广东金融高新技术服务区为依托，建成含多种分布式电源及储能系统的智能配电网自愈控制示范区。现场模拟故障试验表明，自愈控制系统达到了预定目标，为智能配电网自愈控制技术在我国的推广应用奠了定坚实的基础。

彭飞进　李　响　曹志辉　谢志文/广东电网有限责任公司佛山供电局
于　力/南方电网电力科学研究院有限责任公司

彭飞进/高级工程师

关键词/Keywords
智能配电网·
分布式电源·
自愈控制·

0　引言

智能电网运行控制的典型特征是实现自愈控制，其概念最早由美国电力科学研究院（EPRI）和美国国防部在“复杂交互网络与系统计划（The Complex Interactive Networks/Systems Initiative）”中提出。配电环节作为电力系统到用户的最后一环，与用户的关系最为紧密，对系统整体性能效率和用户供电质量的影响也最为直接，其运行控制的水平与供用电的质量和可靠性密切相关。随着配电网络的迅速发展和客户对电能质量及供电服务的要求不断提高，实现配电网的自动化已成为电力系统发展的趋势。与此同时，分布式发电技术的发展对配电网的运行与控制提出了挑战。如何在配电网大规模接入分布式电源的情况下保障配电网安全，如何利用储能装置及微电网技术提高系统关键负荷的供电可靠性是目前电力领域研究的热点。开展智能配电网自愈控制技术的研究能有效解决上述问题[1]。

智能配电网自愈控制可以描述为，在含分布式电源的配电网不同层次和区域内实施充分协调且技术经济优化的控制手段与策略，使其具有自我感知、自我诊断、自我决策和自我恢复的能力，实现配电网在不同状态下的安全、可靠与经济运行[2]。智能配电网自愈控制技术的研究与应用可以突破目前提高供电可靠性方面遇到的瓶颈，可为含分布式电源的智能配电网的安全可靠运行提供有效的技术支撑。

为突破配电网自愈控制技术难点，提高我国配电网的运行控制水平，国家科技部下达了“863计划”智能电网关键技术研发（一期）课题14“智能配电网自愈控制技术研究与开发”，实施期限为2012年1月～2014年12月。课题基于我国配电网现状及智能化发展需求，突破智能配电网仿真、在线安全评估及预警、故障检测、定位及网络重构等方面的关键技术，明确了配电网自愈控制概念，构建了基于分布式智能终端就地控制与主站协调配合的自愈控制技术体系架构，研制了自愈控制保护测控一体化终端和自愈控制系统，并以广东金融高新技术服务区为依托，建成含多种分布式电源及储能系统的智能配电网自愈控制示范区，为智能配电网自愈控制技术在我国的推广应用奠定坚实的基础。

1 自愈控制技术体系架构[2]

智能配电网自愈控制以传统配电自动化技术为基础，依托智能配电网完善的量测通信体系，在配电系统的可观性、可控性、智能化及快速响应方面得到极大改善。根据智能配电网的不同运行状态，以及自愈控制的不同目标和结果，完整的自愈控制技术系统应该包括三个关键环节，如图1所示。

如图2所示，含分布式电源的智能配电网自愈系统在配电网故障发生前的“预防控制”阶段（事前）、故障发生过程的“紧急控制”阶段（事中）及故障修复后的“恢复控制”阶段（事后）实现“自我感知，自我诊断，自我决策，自我恢复”，需要主站集中自愈控制层与分布式终端自愈控制层的有效协同作用。

为了实现主站集中自愈控制层与分布式终端自愈控制层的有效协同，含分布式电源的智能配电网自愈控制总体体系物理架构可以分为三个层次：关键设备层、应用平台层以及具体的技术路线及实施方案，如图3所示。

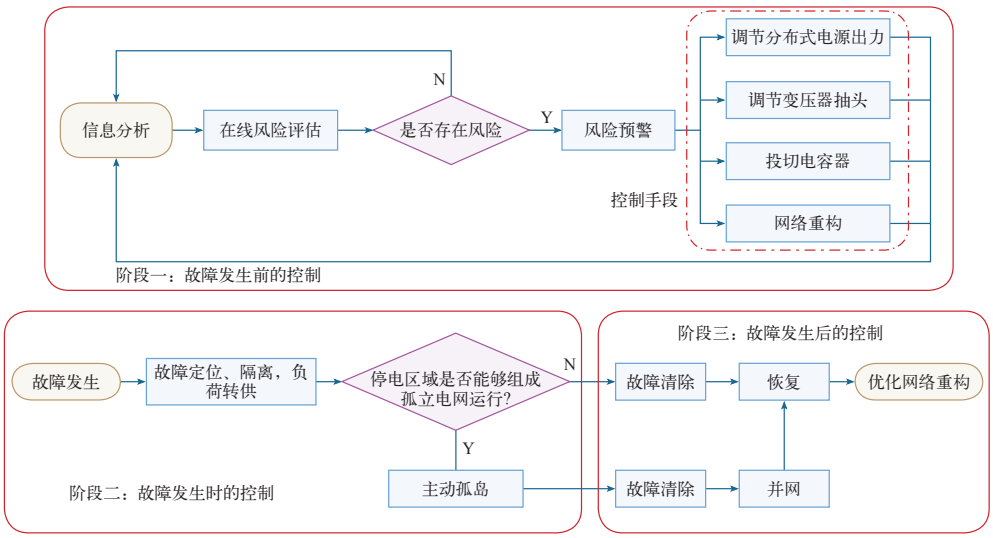


图1 智能配电网自愈控制策略

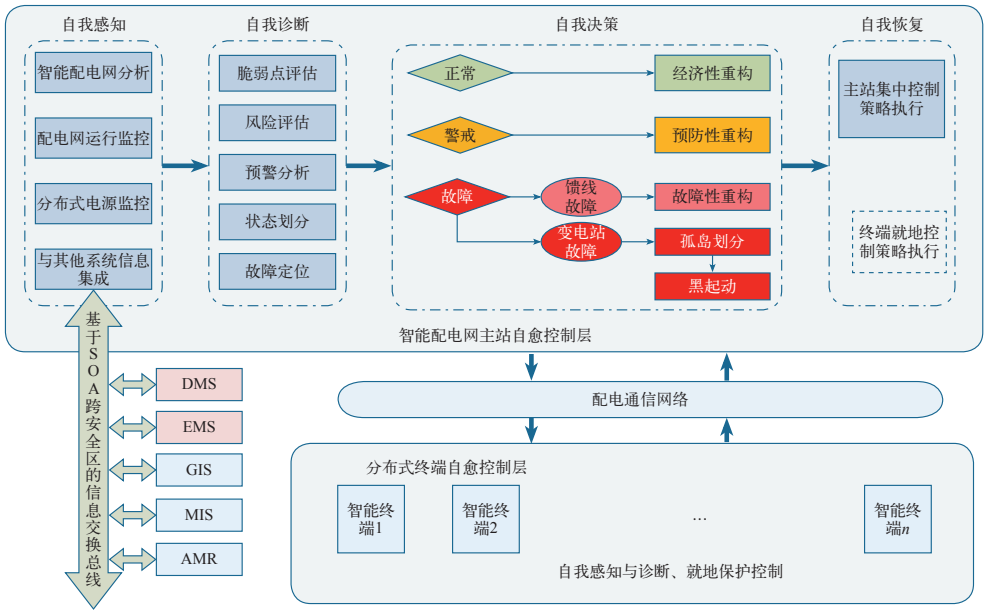


图2 智能配电网自愈控制系统逻辑架构

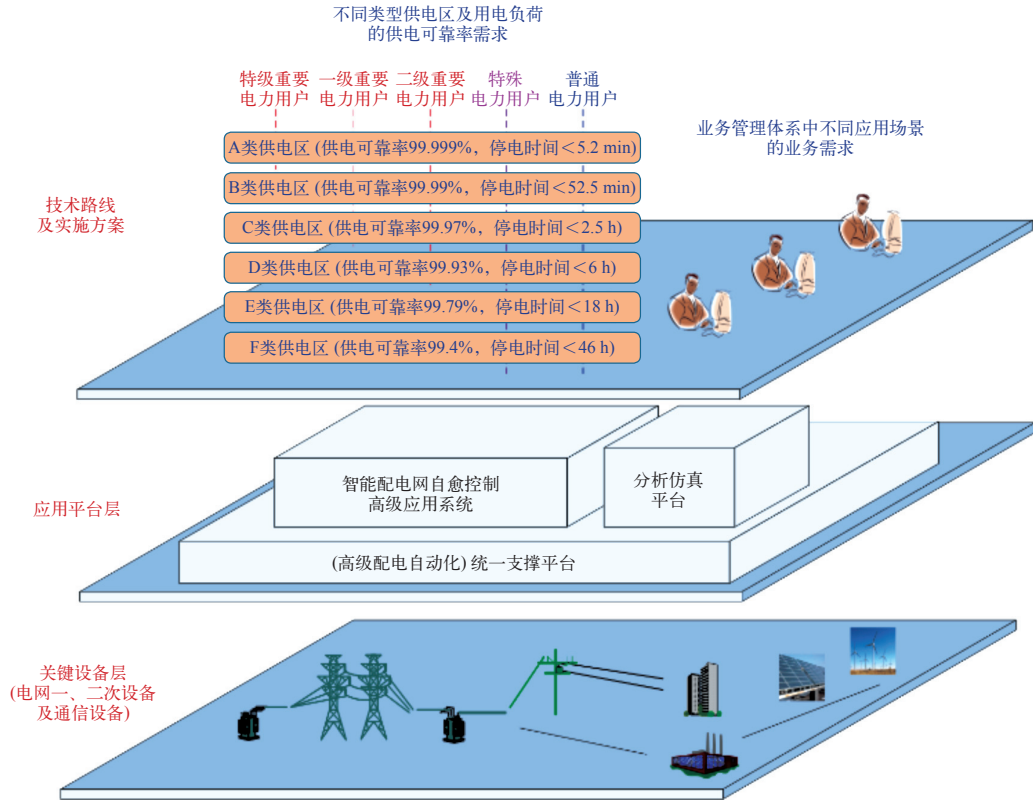


图3　智能配电网自愈控制系统物理架构

2　自愈控制技术实施路线

智能配电网自愈控制技术的实施应基于不同等级类型的供电区域和负荷，在综合考虑负荷特性、分布式电源禀赋和技术经济条件的基础上，选择相应的自愈控制技术方案，具体包括基于故障指示器的故障定位技术、基于时序配合的基本馈线自动化控制技术、基于配电自动化主站的集中控制技术、基于分布式智能配电终端的就地控制技术以及基于分布式智能配电终端和配电自动化主站的综合控制技术等，并建设与之相适应的自愈控制系统平台，如图4所示。

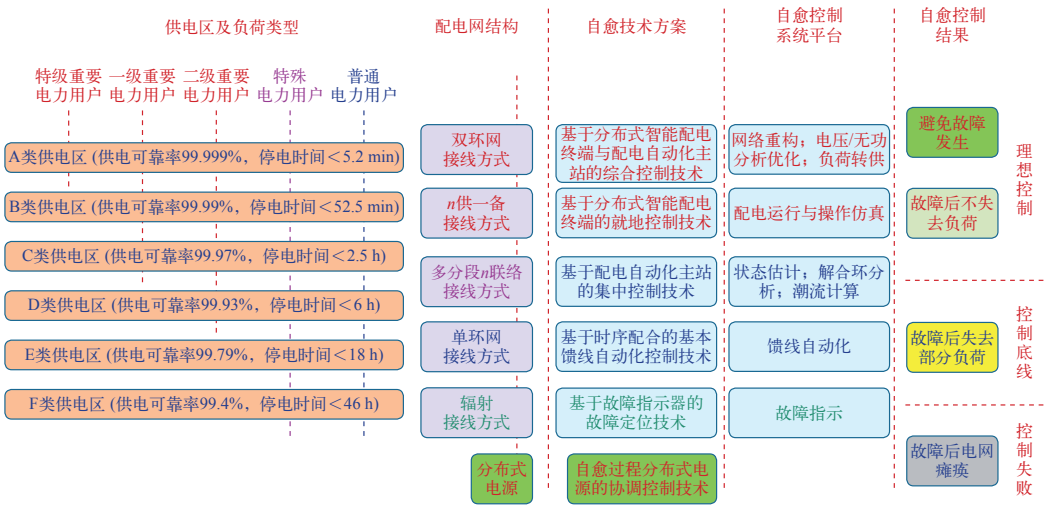


图4　智能配电网自愈控制技术总体实施策略

在同一配电网自愈控制技术实施区域，往往包含不同等级类型的供电区及负荷。在统一的自愈控制系统平台前提下，宜采用与其等级类型相适应的配电网架结构和配电网自愈控制技术方案。在特定区域内实施时，应考虑以下原则。

1）区域范围内配电网自愈控制体系整体最高规格设定原则：自上而下，由区域内主导供电区等级类型决定该区域的平台功能与规格，及其可以支持的配电网架结构和自愈控制技术方案。

2）具体供电区内负荷对象个体化自愈控制方案设置原则：自下而上，由具体的个体化的供电区内负荷的等级类型决定其供电路径上应配置的配电网架结构和自愈控制技术方案。

3 自愈控制关键技术研究

3.1 配电网建模、仿真、分析和试验技术研究[3-6]

智能配电网的建模、仿真、分析、试验理论与方法属于自愈控制技术研究方面的核心基础研究之一，可为智能配电网的系统设计、深层研究与工程应用提供必要、有效的研究工具和手段。

课题对含分布式电源、储能及微电网的智能配电网的建模方法和仿真方法进行研究。面向智能配电网的不同应用场景，研究了智能配电网暂态和稳态建模理论，建立了含分布式电源及储能装置的智能配电网多时间尺度模型库。具体包含：①涵盖了智能配电网中各个结构层面的多时间尺度建模工作，包括一次能源动态模型、新能源并网模型；②针对各种分布式电源以及储能装置在动态过程时间尺度上的明显差异，进行了在不同仿真场景下的模型适应性分析，包括燃料电池、电力电子装置等；③针对智能配电网网络规模庞大、结构复杂、结构与参数高度不对称等典型特征，开展了智能配电网模型化简技术，通过网络模型的整体降维化简，实现高维复杂配电系统快速、准确和高效的分析计算。

针对智能配电不同时间尺度动态过程的具体特点，研究了面向稳态运行模拟的多相潮流计算方法、面向准稳态过程的稳定性仿真方法以及面向暂态过程的电磁暂态仿真方法，提出了基于显式－隐式混合积分算法的稳定性仿真方法、基于投影积分算法的稳定性仿真方法、基于多线程并行计算的暂态仿真方法以及基于高斯算法和牛顿算法相结合的潮流计算方法，进一步提升程序的仿真计算能力。

研究了含分布式电源、微电网及储能装置的智能配电网动态模拟方法，包括RTDS实时仿真方法和仿真建模技术[5-6]，提出了基于FPGA的智能配电网暂态实时仿真系统设计方法；开展智能配电网数字－物理混合仿真技术研究，建立了基于RTDS的智能配电网数字－物理混合仿真与试验平台，平台能够对具有不同电压等级网络架构和各种运行方式下的智能配电网进行建模、仿真与分析，以及进行智能终端、分布式智能控制保护设备等智能配电网二次设备的功能或性能的测试，具有良好的可扩展性；基于RTDS试验平台，开展了基于硬件在环仿真的智能配电网自愈控制装置的试验测试，包括智能配电网自愈控制主站系统、智能配电网保护测控一体化终端和智能配电网故障指示器等，为智能配电网自愈控制技术研究和示范工程的建设提供支撑。

3.2 正常状态下的自愈控制技术研究

研究了智能配电网在线风险评估方法，建立了配电网在线风险评估模型[7]。该模型将风险视为健康度与重要度的二元函数，研究了评估对象的健康度与重要度的影响因素及其权重的确定规则。根据配电网的网络层次及拓扑连接关系，将配电网风险分为四层，包括设备风险、馈线风险、馈线联络组风险以及系统风险。该模型可有效避免基于概率与后果的传统风险评估方法中事件概率难以获得、实用性差的缺点，可实现多维度、多时间尺度的配电网实时在线风险评估。

研究了含分布式电源的配电网安全预警指标体系、运行状态划分和安全预警方法[7]。利用智能配电网风险评估结果计算相应的运行状态划分指标，并将配电网划分为正常状态、警戒状态和故障失电状态，研究了运行状态的相互转换机制。

通过含分布式电源的配电网在线$k(n-1+1)$评估，自动生成预想事故集，提出智能配电网自动预想事故集与故障恢复的匹配方案。

提出了智能配电网预防控制多阶段决策方法，有机融合了调节分布式电源出力、调节无功补偿电容器组、网络重构以及切负荷等控制手段。分析了分布式电源接入后对配电网电压及负载率的影响，提出了一种基于灵敏度分析的多阶段决策的节点电压与线路负载率控制技术。以负荷均衡与节点电压不越限为目标，建立了正常状态下网络重构模型，提出了基本环路矩阵自动生成算法，并利用改进和声算法对网络重构模型进行求解，生成系统的预防控制方案。

3.3 故障情况下的自愈控制技术研究

研究含分布式电源的智能配电网故障检测、定位、隔离及重构技术。提出了基于和声算法的含分布式电源配电网的主站故障定位方法[8]。研究了阶段式故障恢复网络重构方法，并将基本环路矩阵的自动生成算法应用其中[9]，通过制定无不可行解的编码规则，实现了故障停电损失最小、恢复时间最短的目标。

研究智能配电网在极端条件下基于分布式电源孤岛运行的关键负荷保障技术[10-12]。针对分支开关部分可控的情况，考虑分布式电源运行特性，以保障关键负荷为目标，建立了孤岛划分模型，提出了基于深度优先搜索与二进制组合变异粒子群算法的孤岛划分方法。针对分支开关全控的情况，提出了基于Prim算法的孤岛划分方法，可快速地将配电网区域划分为单个孤岛，尽可能多地保障负荷供电，且有利于在故障排除后快速从孤岛模式恢复到并网模式。在孤岛划分的基础，提出了配电网黑起动策略，根据DG特性、容量和配电网结构，并采用Floyd算法确定了DG起动顺序和恢复路径。提出了以自愈主站作为后备控制系统的光储一体化微电网系统的关键负荷保障技术方案。

3.4 自愈控制关键设备

（1）自愈控制系统

智能配电网自愈控制系统是含分布式电源、储能及微电网接入的配电网运行支撑系统，是适应智能配电网发展的高级配电自动化系统，在数据采集与监控、终端就地自愈控制、多系统信息集成、智能配电网分析与评估的基础上，自动根据配电网运行状态进行自我调节，实现配电网四个“自我”；通过风险评估和预防控制、故障发生时的快速自愈处理、故障后的优化重构等功能达到“事前有预防，事中快处理，事后可优化”。

（2）保护测控一体化智能终端

配电网传统的电流保护原理和方法基于独立单元的电压、电流检测，保护之间的协调依靠动作电流定值和动作延时进行配合。在多开关串联运行、联络开关位置和运行方式经常变化的情况下，传统电流保护原理已经完全不适应配电网的现状和需求。

本课题研究提出了一套适合于智能配电网保护的网络式保护原理和算法，其核心是借助对等式通信网络，将每个开关保护单元检测的数据信息、故障判别信息及开关状态等与相邻开关实时共享，使不同地点的保护能够在毫秒级时间内进行协调和配合，保证离故障点最近的断路器速断跳闸，使故障停电范围最小、故障停电时间最短，实现了保护的快速性和选择性的统一[13-15]。

基于网络式保护原理和算法研制出具有网络式保护功能的保护测控一体化智能终端，基本功能包括：三遥功能、通信功能、数据处理功能、数据存储功能、对时功能、远方/本地切换功能、电源管理功能、自诊断/自恢复功能以及维护和调试功能等。高级应用功能包括：线路保护功能、电能质量检测功能、备自投功能、分布式逻辑功能、精确定位功能以及网络式保护功能等。

保护测控一体化智能终端可保证配电网故障时故障停电范围最小、故障停电时间最短，其技术指标处于国际领先水平。

4 示范应用

示范区域金融高新区是于2007年7月2日经广东省人民政府批复同意设立的全省唯一的省

级金融高新区。金融高新区对供电可靠性有极高的要求，2015年其核心区供电可靠率要求达到99.999%。单单依靠管理手段和常规的技术手段无法满足金融高新区的供电可靠性，只有依靠智能配电网自愈控制技术，才能够实现目标。

示范工程在金融高新区配电网一、二次系统改造的基础上，建成含分布式电源及储能系统的智能配电网自愈控制示范园区，覆盖4座变电站、23条配电线路和89个配电房。示范工程于2014年1月投入试运行，2014年9月通过验收，整体运行良好，实现自愈控制正确率达到99.9%，配电网供电可靠率指标2014年达到99.9947%（RS－1）和100%（RS－3）、2015年达到100%（RS－1、RS－3）。

为了验证配电网自愈系统的故障自愈功能、自愈系统故障定位、故障隔离和非故障区域自动复电的功能，在示范区10 kV线路上通过人为设置相间短路故障开展试验工作。一次系统模拟故障试验10 kV馈线简图、相间短路故障试验接线原理图、一次遥测与二次信号时序图、故障前后主站网络图画面对比显示以及故障前后主站电网状态图画面对比显示分别如图5～图9所示。

由图6可以看出，自愈控制系统在0.05 s内实现故障区段定位，在0.1 s内实现故障切除，在0.4 s内实现故障隔离，在2 s内实现网络重构，恢复非故障区段的供电，故障停电影响范围仅限于故障区段，大幅缩减了故障停电时间和范围。

5 结束语

本课题的实施，对推进智能配电网自愈控制技术的发展和实用化起到了至关重要的作用。首先，对于智能配电网自愈控制技术的研究有利于在自愈控制相关算法、仿真试验平台技术和系统

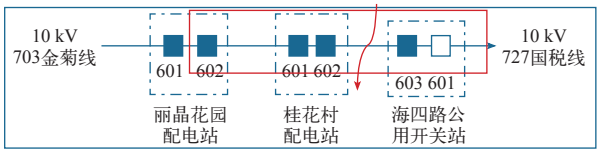


图5 现场一次系统模拟故障试验10 kV馈线简图

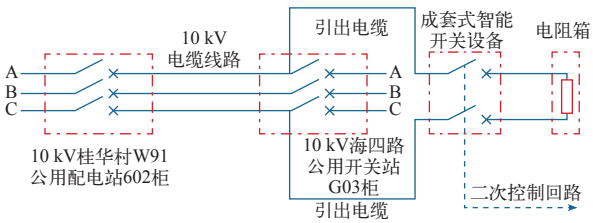


图6 相间短路故障试验接线原理图

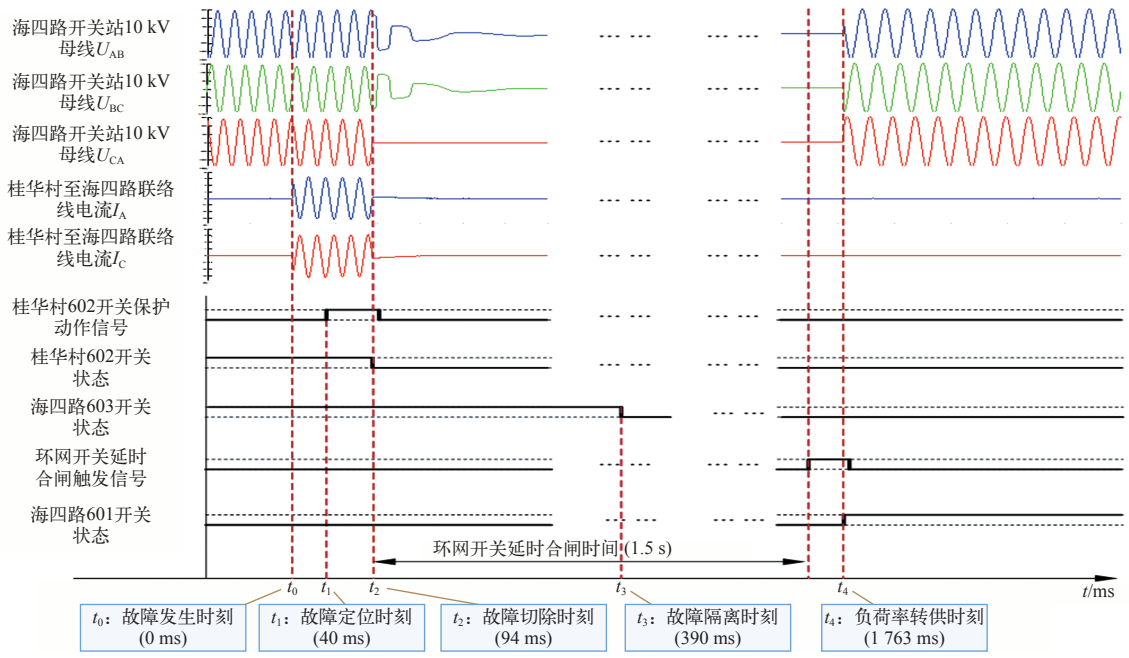
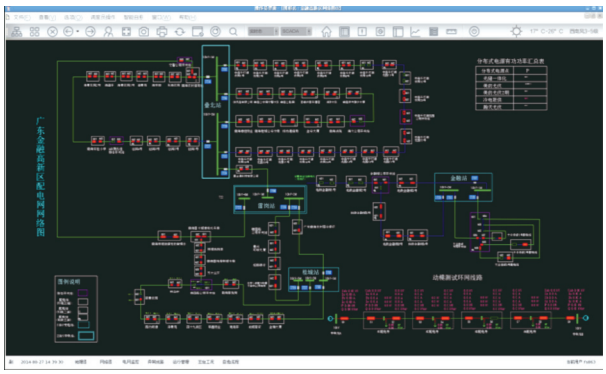
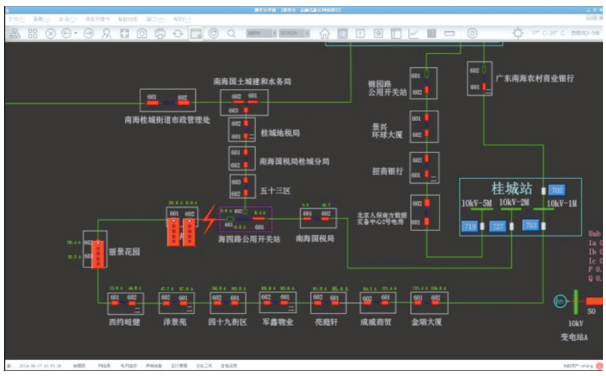


图7 一次遥测与二次信号时序图

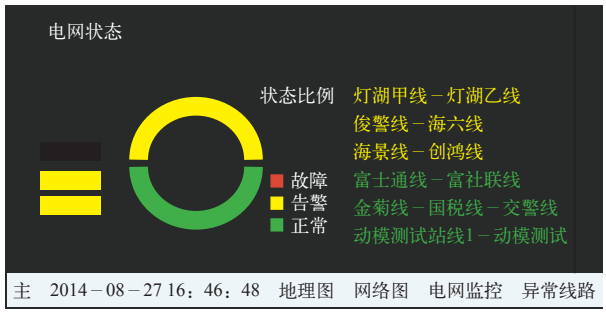


（a）故障前网络图

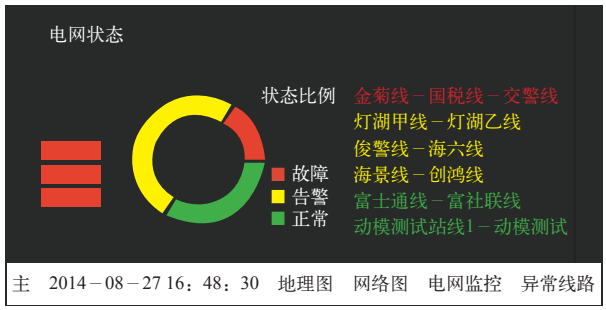


（b）故障后网络图

图8　故障前后主站网络图画面对比显示



（a）故障前电网状态图



（b）故障后电网状态图

图9　故障前后主站电网状态图画面对比显示

开发等方面取得重要突破；其次，智能配电网自愈控制技术的应用能大大减少电网故障时非故障段的停电时间，从而整体提升电网的供电可靠性水平，减少高新技术工业、商业金融等行业因停电所造成的巨额经济损失，具有显著的经济与社会效益；再次，开发具有自主知识产权的智能配电网自愈控制相关核心技术装备有利于提高我国在电气设备制造领域的创造力、竞争力与整体技术水平；最后，建立科学、合理的智能配电网综合评价方法，有利于引导智能配电网科学有序发展，提高我国在智能配电网自愈控制相关科研、设备制造等领域的自主创新能力，为智能配电网自愈控制技术在我国的推广应用奠定坚实的基础。

参考文献

[1] 董旭柱，黄邵远，陈柔伊，等．智能配电网自愈控制技术 [J]．电力系统自动化，2012，36 (18)：17-20．

[2] 董旭柱．智能配电网自愈控制技术的内涵及其应用 [J]．南方电网技术，2013，7 (3)：1-6．

[3] 李鹏，原凯，王成山，等．一种基于投影积分算法的微电网稳定性仿真算法 [J]．电工技术学报，2014，29 (20)：93-101．

[4] 李鹏，孙充勃，王成山，等．基于OpenDSS的智能配电网仿真与模拟平台及其应用 [J]．中国电力，2013，46 (11)：12-16．

[5] 于力，李鹏，许爱东，等．中低压微网算例系统动态时域仿真实现与分析 [J]．电力系统及其自动化学报，2014，26 (12)：28-35．

[6] 于力，许爱东，郭晓斌，等．基于RTDS的有源配电网暂态实时仿真与分析 [J]．电力系统及其自动化学报，2014，26 (12)：18-25．

[7] Li Canbin，Liu Xubin，Zhang Wei，et al．Assessment method and indexes of operating states classification for distribution system with distributed generations [J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2016，7 (1)：481-490．

[8] 刘蓓，汪沨，陈春，等．和声算法在含DG配电网故障定位中的应用 [J]．电工技术学报，2013，28 (5)：280-284．

(下转第93页)

2014，33 (13)：18-22.

[5] Gautam D，Vittal V，Harbour T．Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2009，24 (3)：1426-1434.

[6] 李辉，陈宏文，杨超，等．含双馈风电场的电力系统低频振荡模态分析 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (28)：17-24.

[7] 石辉，张勇军，徐涛．我国智能电网背景下的低频振荡应对研究综述 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (24)：242-247.

[8] 和萍，文福拴，薛禹胜，等．风电场并网对互联系统小干扰稳定及低频振荡特性的影响 [J]．电力系统自动化，2014，38 (22)：1-10.

[9] 罗远翔，杨仁刚，刘铖，等．TCSC提高大容量风电接入系统的稳定性及控制策略 [J]．电测与仪表，2014，51 (4)：35-39.

[10] 李辉，陈宏文，杨超，等．含传输线功率信号的双馈风电场附加阻尼控制策略 [J]．电力系统自动化，2012，36 (24)：28-33.

[11] 边晓燕，杨立宁，黄鑫鑫，等．基于BPA的大规模风电场接入电力系统稳定性分析 [J]．电气应用，2014，33 (23)：164-169.

[12] 张祥宇，付媛，王毅，等．含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合PSS控制器 [J]．电工技术学报，2015，30 (1)：159-169.

[13] 林宇锋，徐政，黄莹．TCSC功率振荡阻尼控制器的设计 [J]．电网技术，2005，29 (22)：35-39.

[14] 刘涛，戴汉扬，宋新立，等．适用于电力系统全过程动态仿真的风电机组典型模型 [J]．电网技术，2015，39 (3)：609-614.

[15] 陈允平，孙婉胜，张海梁，等．低频振荡分析和控制方法的研究 [J]．高电压技术，2007，33 (4)：91-95.

[16] Kunder P．Power system stability and control [M]．New York：McGraw-HillInc，1994.

（收稿日期：2016－02－16）EA

(上接第87页)

[9] 陈春，汪沨，刘蓓，等．基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构 [J]．电力系统自动化，2014，38 (6)：55-60.

[10] 谢夏慧，汪沨，陈奇朋，等．含分布式电源的配电网关键负荷保障方法 [J]．电网技术，2013，37 (5)：1447-1453.

[11] 谢夏慧，汪沨，卢鸣凯，等．大停电后初期基于分布式电源的配电网局部自我恢复方案 [J]．电网技术，2013，37 (7)：1834-1840.

[12] 刘蓓，汪沨，陈春，等．一种配电网故障阶段式恢复方法 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (3)：24-30.

[13] Yuan Qihong，Yuan Qincheng，Li Chunguang，et al．Network based protection based on the peer-to-peer communication－part I：research on the protection of the multiple power and radicalized connection structure [C]．The 6th China International Conference on Electricity Distribution，2014：1-9.

[14] Li Chunguang，Yuan Qincheng，Yuan Qihong，et al．Network based protection based on the peer-to-peer communication－part II：research on the protection of the multiple power and loop connection structure [C]．The 6th China International Conference on Electricity Distribution，2014：1-9.

[15] Huang Xiaoyun，Yuan Qincheng，Yuan Qihong，et al．Network based protection based on the peer-to-peer communication－part III：research on the protection of the breaker and load switch network structure [C]．The 6th China International Conference on Electricity Distribution，2014：1-6.

（收稿日期：2016－03－10）EA