

主动配电网运行控制需求分析及其管理系统设计

张裕, 赵庆明, 李庆生, 农静, 唐学用

(贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵阳 550003)

摘要: 本文首先对主动配电网(ADN)的特点、控制资源和多种运行状态下的过程控制进行了分析。为了实现 ADN 在多种运行状态下的过程控制, 设计了基于 SCADA 平台技术的主动配电网管理系统(ADMS)。ADMS 包含全局运行决策系统、配电自动化系统、负荷主动管理系统等关键子系统。通过各子系统之间的信息交互、协同控制和统一运行管理, ADMS 对并网状态下的 ADN 进行全局优化和区域协同运行控制, 对故障状态下的 ADN 进行故障定位和快速恢复供电运行控制, 对离网状态下的 ADN 进行孤网运行控制, 并对 ADN 各种运行状态下的负荷进行主动控制和管理, 满足 ADN 的运行需求。本文设计的 ADMS 在搭建的实验平台中运行可靠, 为进一步研究和应用 ADMS 提供了参考。
关键词: 主动配电网; 优化运行; 协同交互控制; 孤网运行; 管理系统

Analysis on Demand of ADN Operation and Control and Its Management System Design

ZHANG Yu, ZHAO Qingming, LI Qingsheng, NONG Jing, TANG Xueyong

(Power Grid Planning Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003, China)

Abstract: Firstly, the characteristics of active distribution network(ADN), control resources and process control under various operating conditions are analyzed in this paper. In order to implement ADN process control in a variety of operating state, an active distribution network management system(ADMS) based on SCADA platform technology is designed. ADMS includes comprehensive operation and decision-making system, distribution automation system, active load management system, etc. Through information exchange, assist control and unified operation management of subsystems, the global optimization operation and regional coordinated operation control under grid connected status, fault location and fast recovery power supply operation control under fault status and the isolated network operation control of ADN under off-network status can be carried out in ADMS, and the loads under various operating conditions can be actively controlled and managed to meet the ADN operational requirements. ADMS operates reliably in the experiment platform, and provides the reference for further study of ADMS.

Key words: active distribution network; optimization operation; coordinated interactive control; islanded operation; management system

0 引言

传统配电网是被动的配电网, 相应的运行控制和管理简单, 自动化程度不高, 对接入的分布式电源(DG)只能通过机组自身保护、人工安排等方式进行“被动”投切, 无法有效应对 DG 在未来电网中高度渗透及广泛接入的趋势。随着先进的信息、通信、电力电子以及自动控制技术在配电网的应用, 主动配电网技术应运而生, 其旨在通过利用多种控

制设备组合控制多类型 DG、网络结构、柔性负荷, 满足绿色可再生能源的高度利用以及实现双向潮流灵活控制的配电网^[1-2]。

主动配电网(ADN)运行需要在考虑高渗透率的 DG 接入、保证安全稳定和电能质量的约束条件下, 通过信息分析和利用可控资源, 实现故障快速处理、供电快速恢复、网络重构、孤网运行、全局优化和区域协同运行, 比传统配电网运行复杂、多样、多变。因此, ADN 运行的过程控制管理对信息化技术、自动化技术、控制技术等提出了更高的要求。

国内外专家和学者对 ADN 的运行控制技术和应用系统开发等方面进行了一系列的研究。文献[3-4]提出为了实现对 ADN 的高效经济控制和主

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2014AA051902)。
Foundation item: Supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA051902)。

动特性,必须充分考虑网络结构、DG、可控终端用户的运行模式,研究 ADN 的运行控制技术,开发 ADN 的运行控制系统。文献[5-7]提出了 ADN 全局优化和区域协同优化运行算法。文献[8-13]提出了 ADN 多种分层和分区协调控制技术、运行控制策略、能量管理技术等。文献[14-16]提出了多种考虑 ADN 特性以及分布式能源特性的优化调度模型,实现了 ADN 在充分利用绿色可再生能源的基础上优化控制分布式发电单元、储能单元以及联络开关以达到经济运行的目的,为 ADN 运行控制系统的开发提供了技术基础。文献[17-19]在 ADN 协调控制技术基础上,设计开发了针对 ADN 的综合能量管理系统、电能质量实时监测系统、用户侧能量管理系统。文献[20]综合考虑一次系统接线模式、DG 接入、继电保护和自动控制系统、通信系统、信息采集、运行调度等方面提出了一种 ADN 的一体化设计方法。现有研究成果在不同程度上分别解决了协调控制技术、能源分层分区优化调度技术、柔性负荷主动控制与管理技术以及相关应用系统开发等问题。

上述文献提出了 ADN 的控制技术,并且部分文献设计了功能应用系统,但缺乏对 ADN 实际运行全过程控制的研究以及统一平台管理系统的设计。本文在 ADN 配电自动化、负荷主动控制和管理、全局优化和协调控制以及各应用系统现有研究成果的基础上,分析 ADN 的特点和可控资源,研究 ADN 在并网状态、故障状态、孤网状态下运行的全过程控制,并设计了基于 SCADA 平台技术的统一管理平台 ADMS,解决 ADN 实际运行过程控制问题。ADMS 通过对 ADN 多种运行状态进行实时监控,实现 ADN 资源优化、故障保护和供电恢复、网络重构、负荷控制和管理等,保障 ADN 安全稳定和经济运行。

1 主动配电网特点

ADN 主要由 DG、各类负荷、无功补偿装置、分段开关和联络开关、配电自动化终端、智能用户终端、通信设备以及主站系统等一次设备和二次设备构成,同时为有效平稳间歇式能源的输出功率波动,配有一定容量的储能装置。ADN 的构成特点如下:

1) 是区域型公用网络,含多条 10 kV 线路,甚至包含高压配电网设备,供电范围大于微网。

2) 是多分段开关、多联络开关、环状的网络结构,具有灵活的网络接线方式和网络重构基础。

3) 含多样性、高渗透率的 DG 接入,存在电压波动、继电保护复杂等问题。同时需要根据用户用电信息,利用智能用户终端,对柔性负荷进行主动控制和管理。

4) 是自动化和信息化程度高的智能配电网,采用多种和多层控制技术对源-网-荷进行主动控制和主动管理,实现全局优化运行、区域协同优化运行、故障定位隔离和供电恢复、孤网运行等。

如上所述,相对于传统配电网来说,ADN 运行灵活、可控、主动,可以在全面实时地掌控电源、网络、负荷状态条件下,综合运用灵活的网络结构(控制分段开关和联络开关)^[21-22]、各种 DG (如光伏、风机、储能装置等)^[23]以及电压调节设备(如无功补偿装置、有功移相调节器、有载调压变压器等)、可控负荷等^[24],通过管理系统的主动控制和主动管理技术,实现 ADN 在并网状态和孤网状态下安全稳定运行和故障状态下的供电恢复,实现多目标全局优化运行和区域协同运行。

2 主动配电网可控资源

2.1 分布式 FA 终端对开关的控制

ADN 是一个自动化程度高的配电网网络。由于分布式馈线自动化(FA)很难采集和处理故障状态下 DG 的信息,建议 ADN 配电自动化系统吸取集中型馈线自动化和分布式 FA 优点,由分布式 FA 终端和配电自动化系统主站构成。分布式 FA 终端布置于分段开关、联络开关等处,实现对开关的遥测、遥信、遥控操作,具有同期功能。正常运行状态下,分布式 FA 终端可以对开关进行控制以实现网络重构。故障状态下,分布式 FA 快速定位和切除故障;同时,在配电自动化主站系统协助下,分布式 FA 终端判过载和同期后恢复非故障区域供电。配电自动化主站系统掌握馈线电流信息,同时与 ADMS 的其他子系统进行信息交互,掌握供电恢复区域的分布式电源和负荷信息,协助分布式 FA 终端判过载和同期,实现供电恢复。

2.2 协同交互控制器和本地控制器对 ADN 的分层分区控制

ADN 分层分区控制集成集中式控制与分散式控制的方法,ADMS 收集下层控制器输送的信息,对全局进行统筹;下层控制器控制电网中一块区

域, 根据全局优化确定的优化方法, 针对控制范围内可控对象特点进行局部的控制。

ADN 分层分区控制通常采用区域内自治-区域间交互-全局协调的协同交互控制的控制策略。ADMS 根据全局优化目标对配电网参数信息进行优化运算, 并将控制指标发给协同交互控制器; 协同交互控制器基于其优化目标及参考信息对其所属范围内的 DG 进行局部自治优化。

2.3 智能负荷终端对负荷的控制

随着新型传感器技术、通信技术的高速发展, 应用于 ADN 中的需求侧高级量测体系(AMI) 技术给直接负荷控制技术(DLC) 的发展提供了更多的可能。通过智能插座、智能红外控制器等智能用户终端对空调、电热水器、充电汽车等柔性负荷实现主动控制和管理。

3 主动配电网运行状态及其过程控制需求分析

3.1 并网状态下的全局优化运行和区域协同运行控制

分布式电源就地消纳既能提高能源输送效率和配电设备利用效率, 又能提高供电可靠性。并网状态下, ADN 运行采用分层分区控制技术实现 ADN 全局优化运行和区域协同交互运行。

全局优化运行控制对 DG、网络结构、负荷等实时运行状态进行分析, 通过负荷预测、间歇式能源出力预测, 根据优化算法计算出长时间尺度下的全局优化控制策略, 生成 ADN 局部自治区域的消纳策略。区域协同运行控制在全局优化的结果上, 对 DG 在自治区域内进行实时控制, 应对 ADN 各区域内的短时间负荷波动和间歇式能源波动, 对区域内实时功率扰动进行消纳。区域协同运行控制使得 ADN 在遭受功率扰动时协同控制各个局部自治区域的 DG, 将功率扰动在变电站母线和各个局部自治区域间合理分配, 消除实时运行状态和全局优化目标之间的误差, 使系统运行在全局优化目标的范围内, 而且提高系统的鲁棒性。

ADN 全局优化运行和区域协同交互运行控制在运行管理中的目标是充分整合多种 DG 出力特性、出力调节和柔性负荷调节以及网络联络开关和分段开关灵活控制等资源, 在供电可靠性、电能质量、降低损耗的约束条件下, 最大程度的消纳分布式能源, 提高源-网-荷运行经济性。

3.2 故障状态下的故障快速定位、隔离以及供电恢复运行控制

传统配电网不允许孤岛的存在, 对每个 DG 都装设了反孤岛保护, 以在检测到电网发生故障后迅速切除 DG。而 ADN 是具备有意识孤岛运行能力, 且自愈性更高的配网体系, 允许有意识的孤岛存在, 能充分利用 DG 在电网故障情况下的持续供电能力, 提升系统的供电可靠性。

馈线故障后, ADMS 对故障点进行快速定位和隔离以及负荷转供, 最大可能的缩小停电范围和减少停电时间; 同时, 通过网络调整和负荷调整, 尽量不影响 DG 的消纳。由于 DG 的存在, 对非故障区的供电恢复和转供, ADMS 需要判断过载和判断同期后并网运行。

3.3 孤网运行控制和离网转并网运行控制

ADN 孤岛运行分为计划孤岛和非计划孤岛。计划孤岛时, ADN 和外网的交换功率逐渐降低至零, 然后断开并网点断路器, 同时 DG 转换控制模式, ADN 进入孤岛运行; 非计划孤岛时, ADMS 检测并网点电压和频率, 失压、失频率时并网点开关跳闸, 同时 DG 转换控制模式, ADN 进入孤岛运行状态。

当外部电源供电恢复后, ADMS 控制 DG 电压和频率, 在并网点检测同期后并网运行。由于分布式 FA 终端带有同期功能, 分段开关和联络开关都可以进行并网。

当 ADN 脱离主网, DG 转换到主从控制, 其中一个 DG 或储能装置采取定电压和定频率控制($V-f$ 控制), 用于向 ADN 中的其他 DG 提供电压和频率参考, 而其他 DG 则可采用定功率控制($P-Q$ 控制)。离网转并网后, 各 DG 恢复到 $P-Q$ 控制模式。

3.4 黑启动过程控制

黑启动运行过程中, 首先要分析 ADN 电源的特性, 即明确各 DG 是否具备黑启动条件、是否适宜作为黑启动电源等, 例如, 水电、燃气内燃机、储能具备自启动、快速启动的能力, 因此可以作为黑启动电源; 然后分批增加负荷, 逐步提高黑启动电源出力; 最后考虑并入光伏、风电等。最终达成 ADN 可调发电容量的孤岛运行状态。

3.5 ADN 运行的全过程控制系统化要求和运行管理目标

ADN 运行变化多、复杂, 增加了 ADN 的运行管理难度, 传统的功能系统单独运行管理已满足不了 ADN 运行控制的需求, 需要建立系统化的统一

运行管理平台, 利用多种控制资源, 才能实现 ADN 多种运行状态下运行全过程控制。系统化的统一运行管理目标不仅仅是实现各种状态下 ADN 的安全稳定运行, 缩小停电范围和停电时间, 还有使分布式电源得到有效的利用, 提高配电网设备的利用率, 提高用户用电效率和电能质量。

4 用于主动配电网多种运行状态过程控制管理的 ADMS 设计

4.1 ADMS 架构和系统软件体系

ADMS 通过实时监控、资源优化、故障保护和供电恢复控制、负荷控制和管理, 实现 ADN 的“源-网-荷”全局优化控制、协同交互控制和主动管理, 融合电网“监控系统”、“调度自动化系统”、“能量管理系统”、“配电自动化系统”、“负荷管理系统”等功能。

ADMS 主要由计算机硬件、操作系统、数据库软件、支撑平台软件和各种应用功能软件以及分布式 FA 终端、智能用户终端、协同控制器等终端控

制设备组成。根据应用功能划分, ADMS 包含全局运行决策系统、负荷主动管理系统、配电自动化系统、教学培训系统等子系统。系统采用分布式结构, 由若干台服务器、工作站、网络设备及终端设备构成, 通过网络互连。

ADMS 系统软件按操作系统层、平台(服务)层、应用层等分层设计。ADMS 各子系统之间可进行双向数据信息交互、协助控制, 实现分布式发电数据、负荷数据、网络状态数据以及控制目标等的交互, 达到 ADN 多种运行状态下全过程控制的目的。系统软件体系结构如图 1 所示。

4.2 关键子系统

全局运行决策系统是整个 ADN 的核心, 是实施主动控制和主动管理的关键技术手段。该系统根据全局优化目标、区域控制目标对配电网参数信息进行整合优化运算, 实现 ADN 的全局优化运行和区域协同运行。全局运行决策系统主要功能有: 网络拓扑分析、潮流计算、状态估计、孤岛分析、负

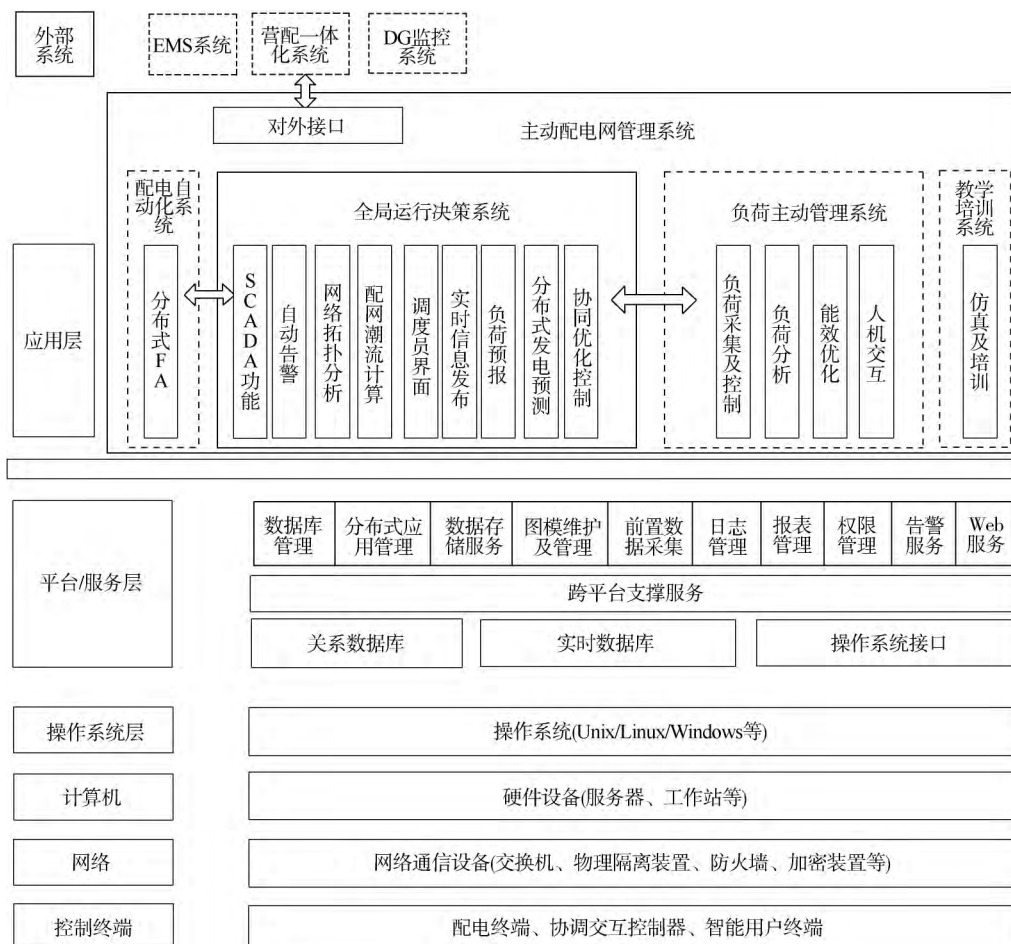


图 1 ADMS 软件体系结构

Fig. 1 Software structure of ADMS

负荷主动管理系统综合负荷状态、DG 状态、电网运行状态信息进行负荷优化计算，并将控制指令发送给智能用电终端，实现区域内负荷主动控制、优化管理和能效提升，与全局运行决策系统进行信息交互。

并网状态正常运行时,ADMS 对分布式 FA 终端、协同交互控制器、分段开关和联络开关进行遥测、遥信、遥控,通过全局运行决策系统的全局优化和区域协同交互处理,实现 ADN 的全局优化运行控制和区域协同运行控制。控制流程如图 2 所示。

```

graph TD
    Start([并网正常运行状态]) --> Collect[分布式FA终端采集电压、电流等信息，并上传数据信息至系统主站]
    Collect --> Fault{是否发生故障}
    
    Fault -- 否 --> Local[分布式FA就地判断故障点，并断开故障点相邻开关]
    Local --> GlobalRetire[全局运行决策系统退出全局运行和区域协调运行控制，进入协助供电恢复模式]
    
    Fault -- 是 --> GlobalRetire
    
    GlobalRetire --> PreFault{故障点前负荷恢复？}
    
    PreFault -- 否 --> Transfer[故障点后负荷转供，分布式FA寻找故障点联络开关]
    Transfer --> Overload{转供线路是否过载}
    
    Overload -- 是 --> Search[分布式FA继续寻找联络开关，如未找到，由主站通知全局运行决策系统进行负荷控制、分布式电源调整]
    Search --> Transfer
    
    Overload -- 否 --> NoVoltage1{分布式FA终端进行无压检测}
    NoVoltage1 -- 是 --> Sync1{是否同期}
    Sync1 -- 是 --> Close1[分布式FA对联络开关进行合闸，恢复供电]
    Sync1 -- 否 --> Assist1[配电自动化系统请求全局运行决策系统协助同期]
    Assist1 --> Adjust1[全局运行决策系统调整分布式电源电压和频率]
    Adjust1 --> Sync1
    
    NoVoltage1 -- 否 --> PreRecovery[故障点前负荷恢复，分布式FA终端进行无压检测]
    PreRecovery --> NoVoltage2{是否无压}
    NoVoltage2 -- 是 --> Close2[分布式FA对联络开关进行合闸，恢复供电]
    NoVoltage2 -- 否 --> Sync2{是否同期}
    Sync2 -- 是 --> Close3[分布式FA对锁线首端开关进行合闸，恢复供电]
    Sync2 -- 否 --> Assist2[配电自动化系统请求全局运行决策系统协助同期]
    Assist2 --> Adjust2[全局运行决策系统调整分布式电源电压和频率]
    Adjust2 --> Sync2
    
    NoVoltage2 -- 是 --> LockLine[锁线首端开关的分布式FA终端进行同期检测]
    LockLine --> Sync3{是否同期}
    Sync3 -- 是 --> Close4[分布式FA对锁线首端开关进行合闸，恢复供电]
    Sync3 -- 否 --> Assist3[配电自动化系统请求全局运行决策系统协助同期]
    Assist3 --> Adjust3[全局运行决策系统调整分布式电源电压和频率]
    Adjust3 --> Sync3

```

Fig. 3 Operation control process of quickly locating fault and realizing fault isolation and fast power supply recovery

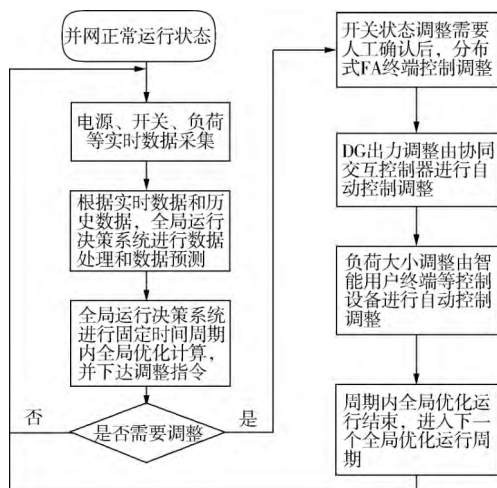


Fig. 2 Global optimal operation and regional coordinated operation control process

FA 快速定位故障点和隔离故障点，其后在恢复供电和转供负荷过程中，配电自动化主站系统向全局运行决策系统收集 DG 发电信息，判断可转供线路是否过载，并请求全局运行决策系统控制 DG 发电电压和频率调同期，分布式 FA 终端判同期后并网恢复供电。如超时间范围内未能同期，配电自动化主站系统请求全局运行决策系统断开 DG 后，恢复非故障区的供电。故障快速定位和隔离以及供电恢复运行控制流程如图 3 所示。

通过分布式 FA 终端检测到上级电源失压或频率发生异常时, ADMS 启动并网转离网的非计划孤岛运行。另外, 还可根据调度安排启动计划孤岛运行。ADMS 分析电源状况和负荷情况, 对 DG 进行主从控制模式和对负荷进行主动控制, 实现孤岛运行。孤岛运行控制流程如图 4 所示。

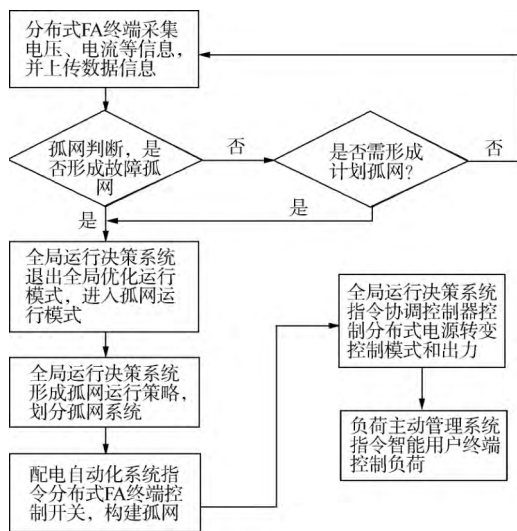


图 4 孤岛运行控制流程

Fig. 4 Control process of shifting to islanded operation

上级电源恢复正常供电后, ADMS 启动离网转并网运行控制。协同交互控制器调整 DG 的电压和频率与系统电压和频率一致, 分布式 FA 终端同期检测, 实现孤岛转并网运行。离网转并网运行控制流程如图 5 所示。

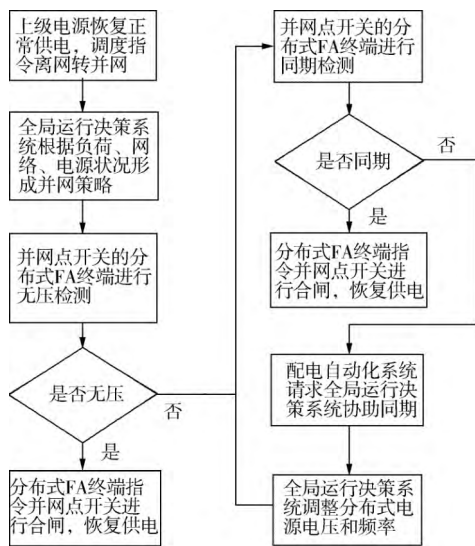


图 5 离网转并网运行控制流程

Fig. 5 Control process of shifting to grid operation from islanded operation

ADMS 分析负荷、DG、网络状态等信息, 制定黑启动控制策略, 启动 V/F 控制模式的主控 DG, 分批恢复重要负荷和其他 DG, 逐步恢复 ADN 重要负荷的供电。ADN 黑启动运行控制流程如图 6 所示。

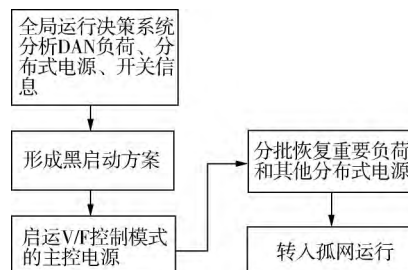


图 6 ADN 黑启动运行控制流程

Fig. 6 Control process of ADN black start operation

4.4 ADMS 应用情况

863 计划课题“集成可再生能源的主动配电网研究及示范”选取贵州电网培训与评价中心(红枫校区)附近的供电网络作为主动配电网示范区。示范区含 5 条 10 kV 线路、众多分段开关和联络开关、多种分布式电源、智能用电终端、协调控制器等设备。基本情况如图 7 所示。

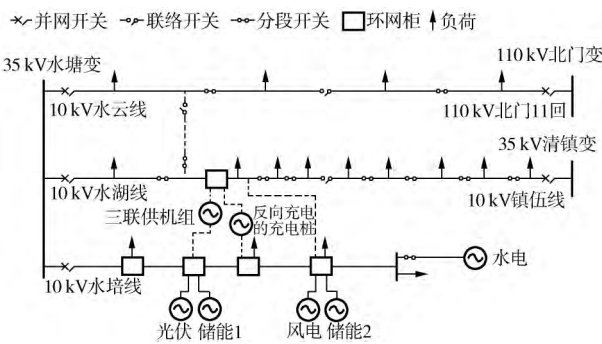


图 7 贵阳主动配电网网络结构

Fig. 7 Network structure of ADN in Guiyang

课题组在上海交通大学智能电网实验室利用 Digsilent、研制的控制终端设备等软硬件资源, 搭建了与示范工程基本一致的主动配电网模型, 部署了 ADMS 进行运行控制。该 ADMS 已经通过第三方测试, 相关测试结果为: 源-网-荷全局优化和协同优化控制中, 联络线功率偏差小于 20%, 可再生能源消纳率 100%, 负荷调节常规周期响应时间小于 5 min。模拟故障发生, 分布式 FA 快速隔离故障点和恢复非故障区域供电。孤岛运行分析与控制中, 孤岛划分计算功率偏差小于 10%, 孤岛运行频率偏差小于 2%, 源、荷、储调节响应时间小于 1

min, 孤岛并网检同期合闸时间小于 5 min。随着第三方测试成功, ADMS 已部署到主动配电网示范工程中应用。

5 结语

高渗透率的分布式能源接入打破了传统配电网简单的运行控制, 给 ADN 运行全过程管理带来了新的技术难题, 传统的功能系统单独运行管理已满足不了 ADN 运行过程控制的需求。本文通过分析 ADN 的特点、可控资源和各种运行状态过程控制, 利用信息化技术、自动化技术和控制技术, 基于 SCADA 平台技术设计了主动配电网的统一运行管理平台 ADMS。该 ADMS 已经部署在国家 863 计划课题“集成可再生能源的主动配电网研究及示范”示范工程中, 将对贵阳市主动配电网示范区进行运行管理, 后续将在示范工程实际运行管理中进一步验证, 以便推广应用。

参考文献

- [1] D'ADAMO C, JUPE S, ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks-update of CIGRE C6. 11 working group activities [C]//IET 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009. Prague, Czech: IET 2009: 1-4.
- [2] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [3] 王守相, 葛磊蛟. 主动配电网系统运行与控制关键技术[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 85-90.
WANG Shouxiang, GE Leijiao. Key technology of operation and control of active distribution system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 85-90.
- [4] 刘广一, 黄仁乐. 主动配电网的运行控制技术[J]. 供用电, 2014(1): 30-32.
LIU Guangyi, HUANG Renle. Operation control technology of active power distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2014(1): 30-32.
- [5] HANY E Z F, EHAB F EL. A novel cooperative protocol for distributed voltage control in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1645-1656.
- [6] 尤毅, 余南华, 张晓平, 等. 主动配电网分布式能源分区消纳实时协调控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(8): 71-76.
YOU Yi, YU Nanhua, ZHANG Xiaoping, et al. Real-time coordinating control of regional consumption of distributed energy source in active distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(8): 71-76.
- [7] ALBERTO B, ALBERTO C N, MARIO P, et al. Synchronized phasors monitoring during the islanding maneuver of an active distribution network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 82-91.
- [8] 刘东, 陈云辉, 黄玉辉, 等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5500-5506.
LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5500-5506.
- [9] 钟清, 张文峰, 周佳威, 等. 主动配电网分层分布控制策略及实现[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1511-1517.
ZHONG Qing, ZHANG Wenfeng, ZHOU Jiawei, et al. Hierarchical and distributed control strategy for active distribution network & its implementation [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1511-1517.
- [10] 于汀, 刘广一, 蒲天骄, 等. 计及柔性负荷的主动配电网多源协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 95-100.
YU Ting, LIU Guangyi, PU Tianjiao, et al. Multiple coordinated optimization control of active distribution network considering flexible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 95-100.
- [11] 黄伟, 崔屹平, 华亮亮, 等. 基于小水电及储能的主动配电网电压控制[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 103-109.
HUANG Wei, CUI Yiping, HUA Liangliang, et al. Active distribution network voltage control based on the small hydropower and energy storage device [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 103-109.
- [12] WU J, GUAN X. Coordinated multi-microgrids optimal control algorithm for smart distribution management system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2174-2181.
- [13] VACCARO A, POPOV M, VILLACCI D, et al. An integrated framework for smart microgrids modeling, monitoring, control, communication, and verification [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 119-132.
- [14] 李建芳, 丛鹏伟, 孟晓丽, 等. 基于自适应粒子群算法的主动配电网日前有功调度[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 85-91.
LI Jianfang, CONG Pengwei, MENG Xiaoli, et al. Day-ahead active power scheduling of active distribution network based on adaptive particle swarm algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 85-91.
- [15] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23.
PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Application and architecture of multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23.
- [16] 曾鸣, 彭丽霖, 王丽华, 等. 主动配电网下分布式能源系统双层阶段调度优化模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 108-115.
ZENG Ming, PENG Lili, WANG Lihua, et al. Two-stage dual-level dispatch optimization model of distributed energy system in active distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 108-115.
- [17] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 177-183.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 177-183.

- [18] 鲁文,李卫星,杜红卫,等. 主动配电网综合能量管理系统设计与应用[J]. 电力系统自动化,2016,40(8): 133-139.
LU Wen, LI Weixing, DU Hongwei, et al. Design and application of integrated energy management system in active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 133-139.
- [19] 曲广龙,杨洪耕,李兰芳,等. 主动配电网电能质量实时监测系统设计与实现[J]. 电力系统自动化,2015,39(10): 117-123.
QU Guanglong, YANG Honggeng, LI Lanfang, et al. Design and realization of power quality real-time monitoring system for active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 117-123.
- [20] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护和控制,2015,43(11): 49-55.
LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [21] 赵晶晶,李新,彭怡,等. 基于粒子群优化算法的配电网重构和分布式电源注入功率综合优化算法[J]. 电网技术,2009,33(17): 162-166.
ZHAO Jing-jing, LI Xin, PENG Yi, et al. A comprehensive optimization for injection power of distributed generation and distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization [J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 162-166.
- [22] BRUNO S, LAMONACA S, LA SCALA M, et al. Integration of optimal reconfiguration tools in advanced distribution management system [C]//2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), June 12-15, 2012, Berlin. Berlin: IEEE, 2012: 1-8.
- [23] 周德佳,赵争鸣,袁立强,等. 具有改进最大功率跟踪算法的光伏并网控制系统及其实现[J]. 中国电机工程学报,2008,28(31): 94-100.
ZHOU Dejia, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Implementation of a photovoltaic grid-connected system based on improved maximum power point tracking [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 94-100.
- [24] WANG C, NEHRIR M H, GAO H. Control of PEM fuel cell distributed generation systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2): 586-595.

收稿日期: 2016-08-25

作者简介:

张裕(1983),男,工程师,硕士,从事电力系统新技术应用研究、电网规划设计和线损理论计算等工作, zhangyu830906@163.com;

赵庆明(1975),男,高级工程师,博士,从事电力系统继电保护、安全稳定和电网规划等研究;

李庆生(1971),男,高级工程师,学士,从事电网规划、微电网、分布式能源、主动配电网技术等研究。

(上接第15页 Continued from Page15)

- [6] 杨昱. 电力系统模型预测控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学,2013.
- [7] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社,1993.
- [8] 席裕庚,李德伟. 预测控制定性综合理论的基本思路和研究现状[J]. 自动化学报,2008,34(10): 1225-1234.
XI Yugeng, LI Dewei. Fundamental philosophy and status of qualitative synthesis of model predictive control [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(10): 1225-1234.
- [9] 睢刚,韦红旗,陈绍炳,等. 单元机组负荷多变量模型预测控制[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4): 144-148.
JU Gang, WEI Hongqi, CHEN Shaobing, et al. Multivariable model predictive control for thermal power unit load system [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 144-148.
- [10] 周念成,付鹏武,王强钢,等. 基于模型预测控制的两区域互联电网 AGC 系统研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(22): 46-51.
ZHOU Niancheng, FU Pengwu, WANG Qianggang, et al. Research on AGC of two area interconnected power system based on MPC [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 46-51.
- [11] ZONG Y, KULLMANN D, THAVLOV A, et al. Application of model predictive control for active load management in a distributed power system with high wind penetration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 1055-1062.
- [12] 刘畅,刘东,王云,等. 模型预测控制方法在主动配电网协调控制中的应用[J]. 电器与能效管理技术,2015,(11): 44-51.
LIU Chang, LIU Dong, WANG Yun, et al. Application of model predictive control method in active distribution network coordination control [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015, (11): 44-51.
- [13] 刘东,陈云辉,黄玉辉,等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31): 5500-5506.
LIU Dong, CHEN Yunhui, HUANG Yuhui, et al. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5500-5506.
- [14] 于文鹏,刘东,余南华. 馈线控制误差及其在主动配电网协调控制中的应用[J]. 中国电机工程学报,2013,33(13): 108-115.
YU Wenpeng, LIU Dong, YU Nanhua. Feeder control error and its application in coordinate control of active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 108-115.
- [15] 常康,丁茂生,薛峰,等. 超短期风电功率预测及其在安全稳定预警系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(12): 19-24.
CHANG Kang, DING Maosheng, XUE Feng, et al. Ultra-short-term wind power prediction and its application in early-warning system of power systems security and stability [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 19-24.

收稿日期: 2016-08-30

作者简介:

林威(1992),男,硕士研究生,研究方向为智能电网、主动配电网, lw_1992@foxmail.com;

刘东(1968),男,博士,研究员,博士生导师,教育部新世纪优秀人才,研究方向为智能电网、主动配电网、电网信息物理融合系统, dongliu@sjtu.edu.cn;

李庆生(1971),男,高级工程师,学士,从事智能电网、微网以及分布式能源等研究, lqs98@126.com。