

DOI: 10.7667/PSPC161792

主动配电网辅助服务共享机制控制模式的研究

李滨, 李星辰, 阳育德, 陈碧云

(广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004)

摘要: 主动配电网需要依托先进的控制模式管理网络。首先介绍了电力市场环境下配网辅助服务的发展要求。其次, 对比了国内外含不同辅助服务成分的配网控制模式, 由此提出了一种辅助服务共享的主动控制模式。该模式在信息交互量最小的前提下兼顾全局优化和局部优化, 在3层结构中调度可调负荷为配网提供辅助服务。最后以馈线功率波动方差校验控制模式的有效性。仿真结果表明, 无论是正常运行还是故障状态, 所提出的控制模式充分整合了辅助资源, 有效降低了配网功率波动。

关键词: 主动配电网; 协调控制; 分布式电源; 可调负荷; 辅助服务

Research of control model with ancillary services sharing mechanism for active distribution network

LI Bin, LI Xingchen, YANG Yude, CHEN Biyun

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

Abstract: The active distribution network demands advanced control model to manage network. This paper begins with an introduction to the development requirements of ancillary services in distribution networks under an electricity market environment, and then different control models with diverse ancillary services at home and abroad are compared. Based on that, an active control model with ancillary services sharing mechanism is proposed. Both sides of the global and local optimization are considered under the condition of minimal information exchange, meanwhile, the adjustable loads are dispatched to provide ancillary services in a structure of three layers. At last, the efficiency of the model is evaluated by the fluctuation variance of power. Simulation results show that the proposed control model integrates ancillary resources fully and reduces power fluctuations available in normal or abnormal circumstances.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51541707) and National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205).

Key words: active distribution network; coordinate control; distributed generation; adjustable load; ancillary service

0 引言

2015年11月30日, 国家发展改革委、能源局在印发的电力体制改革配套的文件中明确提出:“售电业务向社会开放, 多途径培育市场竞争^[1]”。这标志着配电网无法继续无偿获得主网支援, 要在市场环境下自行维持运行稳定。主动配电网(Active Distribution Network, ADN)可以解决这个问题, 利用分布式电源(Distributed Generation, DG)和可调负荷(储能、电动汽车和空调等用电时间可平移的负荷)提供辅助服务(Ancillary Services, AS), 在统一交易

平台上匹配供求, 使电力用户参与市场互动, 进而管理网络和优化资产^[2-6]。要实现以上功能, 建立多方参与的ADN控制模式势在必行。

许多发达国家已经成熟运用辅助服务, 建立独立竞价的辅助市场, 西班牙和德国通过小型DG连接至配网提供辅助服务^[7]。在完善的监管和接入协议下, 含AS的主动控制模式就可以灵活管理网络。文献[8]建立了智能配网综合储能系统, 以此提供辅助服务。文献[9]从用户侧出发, 提出了ADN控制管理方案。文献[10]运用灵活高效的多代理控制作为控制模式。文献[11-12]以外电网和配网交换功率的实际值与计划值之差为控制标准, 调度辅助资源。文献[13-14]进一步将控制模式细化至不同控制等级的互联接口, 为DG发电商和用户即插即用的

基金项目: 国家自然科学基金项目(51541707); 国家重点基础研究发展规划项目(973项目)(2013CB228205)

功能。上述研究从不同角度阐述了不同的 ADN 控制模式, 对提高控制效率、提升配网控制水平起到了十分重要的作用。但仍需要考虑以下几点问题:

1) 为了减少主动控制区对外网支援的依赖, 需要多种 AS 供应商互相配合; 2) 要实现对不同互连单元的动态控制, 就必须协调操作简易性与安全供应性的冲突; 3) 代理商可能不愿意损失自身利益而达到全局最优化, 因此控制模式需要成熟的电力市场运作机制作为保障; 4) 控制模式需要包含一定扩展性, 以适应未来配网的发展。

控制模式的研究, 关键是整合开放市场下的辅助服务。本文通过分析市场环境下 AS 的发展要求, 综合已有控制模式的特点, 从未来可调负荷不断增长的角度出发, 重点研究 AS 提供备用服务, 并提出了一种 AS 共享机制的 ADN 控制模式, 将无序被动响应转化为有序主导调控。

1 电力市场环境下的辅助服务

主动配电网顺应了市场化的要求, 势必成为电力改革的催化剂。回顾电力发展史, 大部分国家都经历了从垄断到市场化的历程。中国电力体制改革始于 1985 年, 解决了严重缺电的顽疾, 但也产生了能源利用效率低下等问题。从 2002 年开始实施电力市场化改革, 在改组电网公司和重组发电资产等方面取得了一定进展, 但由于改革步伐不一致和“单一买者”结构没有打破等原因, 有效的市场竞争机制尚未形成^[15]。目前, 中国电力市场建设必须与体制改革进程相适应, 同时引入民间资本, 坚持输配分离、扶持新能源发展、增强配网主动管理和完善辅助服务市场。

辅助服务是电力市场的重要组成部分, 作为一种机制保证配网运行稳定。中国电力辅助服务市场始于 2006 年, 以国家电监会制定的《并网发电厂辅助服务管理暂行办法》为标志。然而, 无偿的电厂辅助服务降低了发电企业的积极性。本质上, 提供 AS 存在着投资、安全和效率等成本, AS 成本决定其价值, 完全具备与电能同样的产品属性。电力市场环境促使 AS 供求市场的形成, 通过对容量和价格竞标向市场提供备用和调频等服务, 这与 ADN 运营机制相辅相成。

总结市场环境下 AS 参与 ADN 管理的要求为:

1) 建立双边互动渠道, 鼓励多方参与竞争; 2) 相关政策和监管框架必须完善; 3) 不同的可调负荷具有不同的动态特性, 必须建立配套的控制模式。

2 主动配电网控制模式

主动配网包含以下 6 个模块: 1) 能源管理系统; 2) 数据采集监控系统; 3) 远程终端装置; 4) 先进的基础计量设施; 5) 状态估计算法; 6) 发电负荷预测系统^[16]。

6 个模块互相配合, 可以构建 3 种控制模式:

1) 集中式, 在小型配网中响应时间最快、控制性能最佳; 但在大型网络中鲁棒性、扩展性较差。2) 分散式, 网络通信量少, 整体计算量低; 但无法保证良好的全局性。3) 多层式, 底层就地控制, 实现备用设备快速响应; 中间层局部控制, 协调指定区域内多个节点运行方式; 顶层全局优化, 通过智能算法提出优化策略。该模式综合了集中式和分散式的优点, 已经成为了大多数研究的重点^[17]。在这些研究中, 主要分为单控某种 AS 成分提供备用或者多种成分协调控制。

2.1 单一成分

单一成分是控制模式的基础, 只运用储能或者 DG 为配网提供 AS。由欧盟第 6 个框架计划主导的主动配电网示范工程是较早对实际配网进行控制的著名项目^[18]。中央控制器通过状态估计(节点最大和最小电压, 变电站和发电机电压), 为每一个本地控制器设定初始控制值。当某些节点电压变化异常时, 中央控制器重置故障点所在的本地控制器的控制值, 本地控制器通过调节相应 DG 稳定配网。

2.2 多种成分

未来电网发展的要求为配网、DG 和负荷全面互动。多代理控制可以满足这个要求: 底层是本地设备代理, 如 DG 代理; 第二层是区域协调代理, 如虚拟发电厂代理; 第三层是最高控制层, 拥有监督和管理网内代理的权利^[19]。代理之间的协调问题, 可通过微观经济学的市场协调机制解决: 每一个代理通过支路的集中代理向交易中心上报竞价, 交易中心汇总后, 得到每条支路的最终价格, 随后反馈至支路的集中代理, 最终每个用户根据这个价格决定自身的发电量或消费量, 如图 1 所示^[20]。

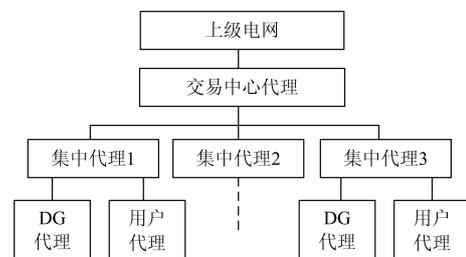


图 1 多代理控制模式

Fig. 1 Control model with multi-agents system

为方便用户参与辅助服务，下一步 ADN 的研究需考虑互联接口问题：底层的 DG 通过转换接口接入一条直流母线，当本层独立运行时，本地控制器保持供需平衡；在中间层，将直流母线和负载汇集至一条交流母线，由逆变控制器利用下垂控制方法控制本层运行稳定；顶层设置协调控制器，为逆变控制器设定稳定点，控制模式见图 2^[21]。

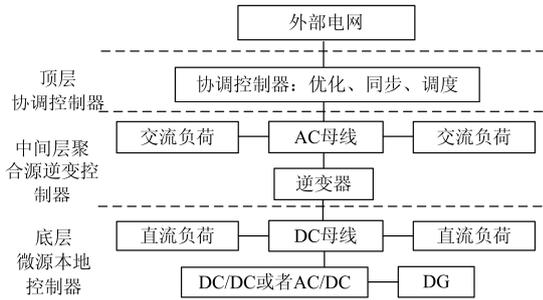


图 2 含直流母线的混合多层配电网

Fig. 2 Hybrid hierarchical network with DC buses

2.3 控制模式建立原则

综合上述模式特点并结合我国国情，ADN 控制模式的设计需要遵循以下原则：1) 我国电力市场正处于起步阶段，配网不应限制或者降低 DG 出力。2) 未来辅助服务资源有增无减，考虑联合多种可调负荷参与 ADN 控制可以进一步提高电网稳定性。3) 多种可调负荷需要互相配合，控制模式要在不影响用户正常生产生活的前提下，调度相应设备提供辅助服务。4) 为保证控制时效性，应该尽量减少核心区域信息流量，防止命令阻塞。

3 辅助共享机制的控制模式

结合上节总结的 4 点要求，本文提出了辅助共享机制的主动控制模式，正常运行时保证可调负荷高效提供备用服务，减小信息堵塞；故障运行时及时遏制危害扩散，降低经济损失。该模式与电量交易市场并行，有利于公平竞价，鼓励更多环节参与配网的管理。控制构架闭环设计，开环运行，含 3 层结构：中央、馈线和单元层，每一层都有相应控制系统，以此完成控制策略的传递和执行。

1) 第一层，令 110 kV(或 35 kV)变电站为中央控制区。根据发电量、负荷需求和电力市场规则，制定经济调度计划，设置配网各项操作指标，通过优化算法和在线信息通道安排 ADN 控制策略。同时，中央控制系统采取运行监视自动化模式，通过具有遥信、遥测功能的下层配电终端，及时收集配网的运行状态及故障信号。由此，中央控制区负责协调调度各种网内资源，提高 ADN 的协同效益。

2) 第二层，中央控制区下属每一条 10 kV 馈线设置为一个馈线控制区。在一个调度周期之内，记录本地负荷波动信息，收集馈线中可调负荷的状态信息(储能可用容量、空调温度和电动汽车电量等)，在充分保证DG高渗透率的同时减小馈线功率波动，保障功率就地动态平衡。当整个控制区域中某一馈线控制区出现紧急故障情况时，采取就地控制自动化模式，通过现场配电终端、保护装置和自动化开关装置相互配合以及自我决策，准确定位故障点，快速隔离故障、恢复非故障区域供电，并将故障信号、开关动作和运行状态等信息及时上报中央控制系统。如果该馈线无法自行消除故障，采取集中控制自动化模式，故障区及周边馈线的控制系统改由中央控制区统一指挥，重新接收调度指令，给予整个网络临时性的事故支援。

3) 第三层，在馈线控制区内以一定规则聚合的单元组设置为单元控制区，包含具体电源、负荷、接口和开关。可由地理位置相近的节点组成(如住宅小区、学校或者办公写字楼群)，也可以由接口集合地组成(比如电动汽车充电桩集合或者DG及相应储能设备)。单元控制区作为信息传递的源头，通过实时收集相应负荷信息，及时反馈至馈线控制区，起到执行具体操作和故障监视的作用。

通过上述多层控制模式，ADN 可以实现潮流管理、故障定位、减少负荷波动冲击和增大 DG 渗透率等目的。在减少对外网的依赖和减轻中央控制系统信息汇集压力的同时，确保控制区内用户用电的安全可靠。正常运行时，充分调配网内资源，实现配网内各方利益的最大化。故障时，快速适应环境的变化，及时恢复配网供电能力。控制模式框图见图 3。此外，主动控制模式设计也要考虑继电保护问题^[22]。保护和具体单元的的定位和调度非文本讨论重点，将在下一步研究中阐述。

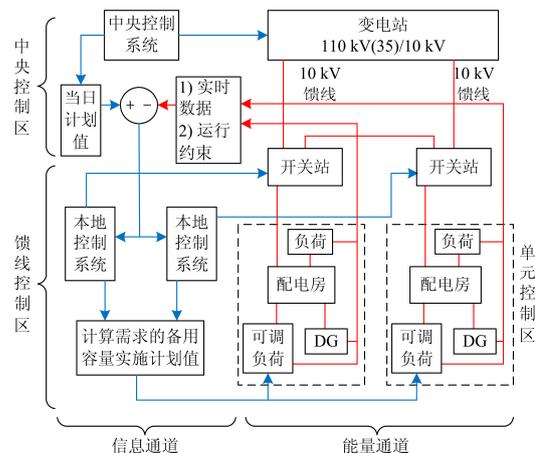


图 3 辅助服务共享机制的控制模式

Fig. 3 Control model with ancillary services sharing mechanism

3.1 正常情况

正常情况下, 首要目标是使本地实际下网功率接近计划值。中央控制区只起到监视的作用, 以此减少配网日常信息交互压力。各馈线采用恒定馈线功率控制方式保障本馈线电能质量, 将外网视为无穷大电源, 当日负荷量及 DG 发电量可以准确预测, 以流入馈线为正方向, 控制目标函数为

$$P_{DEV.A} = P_A - P_{A0} \quad (1)$$

式中: $P_{DEV.A}$ 为馈线 A 的首端节点的恒定馈线功率误差; P_A 为馈线 A 的实际线路下网有功功率; P_{A0} 为馈线 A 的计划有功功率。

假设馈线 A 有 n 个单元控制区, 则 P_A 为

$$P_A = \sum_{i=1}^n (P_{A.L.i} - P_{A.DG.i} + P_{A.S.i}) \quad (2)$$

式中: $P_{A.L.i}$ 为第 i 个单元控制区内实际负荷值; $P_{A.DG.i}$ 为 DG 实际出力值; $P_{A.S.i}$ 为已用备用容量。

各个本地控制系统根据历史数据和昨日网区运行情况, 独立制定控制区的当日功率下网计划值 P_{A0} , 并与 P_A 比较。由定义式可知, 本地馈线控制系统的目标是实时保证 $P_{DEV.A} = 0$ (特定时段内可以小于一定数值), 当 $P_{DEV.A} > 0$ 时, 说明此时馈线负荷突然增加, 实际流入值大于计划值(或者实际送出值小于计划值), 需要储能装置增大输出功率, 当作电源使用, 同时减小可中断负荷用电量(电动汽车结束充电, 夏季家用空调上调最低温度限制等); 当 $P_{DEV.A} < 0$ 时, 说明此时负荷骤然下降, 储能装置应该减少输出, 甚至存储一部分电力, 同时增大可中断负荷用电量。

馈线控制区设置 3 个控制阈值: 1) 死区阈值, 为减小可调负荷调度成本, 微小的功率波动不进行功率补偿; 2) 正常调节阈值; 3) 紧急调节阈值, 馈线功率波动异常时, 向临近馈线求助。只要 $P_{DEV.A}$ 进入正常调节时段, 馈线中的本地控制系统由功率自动调控策略计算出一个调度周期内功率调节量, 于此同时, 根据单元控制区上报的信息, 求出馈线剩余的可调负荷的容量(假设此时需要 m 个可调负荷平抑功率波动)为

$$P_{DEV.A} = \sum_{i=1}^m \alpha_{A.i} \cdot P'_{A.S.i} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{A.i}$ 为第 i 个可调负荷的功率调节系数, $\sum \alpha_{A.i} = 1$; $P'_{A.S.i}$ 为备用可调负荷 i 的容量。

控制策略为: 1) 各控制区根据各自计划值监视本地功率实际值。2) 死区阈值范围内, 系统不响应功率偏差。3) 正常调节范围内, 系统调度相应可调负荷快速响应, 使 $P_{DEV.A}$ 接近零。

3.2 故障情况

故障时, 首要目标是及时减小故障馈线功率大幅度波动。本地控制系统反映控制区内的可调负荷容量不足, 进入紧急调节时段。改由中央控制系统统一指挥, 借调临近馈线区中空余的可调负荷容量提供支援。假设馈线 A 进入紧急调节阈值, 借调临近馈线 B 中 m' 个空余备用容量:

$$P_{DEV.A} = \sum_{i=1}^m \alpha_{A.i} \cdot P'_{A.S.i} + \sum_{i=1}^{m'} \alpha_{B.i} \cdot P'_{B.S.i} \quad (4)$$

式中, 令 $\sum \alpha_{A.i} \cdot P'_{A.S.i} = H_A$ 。

当需要多条临近馈线共同承担功率异常波动时, 中央控制系统自动计算功率调节量的比例, 指定每个被借调馈线的容量需求。事实上, 中央控制系统已经根据历史数据, 备案有下属馈线可调负荷的事故空余容量系数。

$$\beta_i = P_{R.i} / P_T \quad (5)$$

式中: β_i 为馈线 i 的事故空余容量系数; $P_{R.i}$ 为馈线 i 的事故空余容量; P_T 为中央控制区下属所有的事故空余总量。

假设馈线 A 需要附近 N 个馈线共同支援。

$$P_{DEV.A} = H_A + \sum_{i=1}^N \beta_i H_i \quad (6)$$

控制策略为: 1) 故障发生后, 由配电自动化设备定位故障点, 中央控制系统计算备用容量差额, 故障区进入紧急调节范围; 2) 中央控制系统根据差额和事故空余容量系数借调临近馈线的备用支援故障区。避免大功率波动对附近变压器、用户和保护设备的冲击; 3) 所有备用快速响应功率偏差, 稳定电压和频率, 故障解除后结束支援状态, 各区域恢复正常运行状态。

4 主动配网控制模式的评价标准

在一个调度周期内(一天), P_{DEV} 随着配网线路功率波动实时变化, 可调负荷由于在不同调度时间内具有不同响应时间, 补充功率差额或者吸收剩余功率需要一定时间才使得 P_{DEV} 趋向于零。因此, 以 P_{DEV} 作为一个调度周期内控制模式的评价标准缺乏时效性和灵活性。

本文提出以馈线功率波动方差 $f_{P.T}$ 作为评价 ADN 控制模式优劣的标准, $f_{P.T}$ 是一个调度周期内的动态评价价值, 表达式如式(7)所示。

$$f_{P.T} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_{DEV.i,t} - \overline{P_{DEV.i,T}})^2} \quad (7)$$

式中: $P_{DEV.i,t}$ 是 t 时刻馈线 i 功率误差实际瞬时值; $\overline{P_{DEV.i,T}}$ 是 T 时段功率误差平均值。为充分描述一天

之中 P_{DEV} 变化情况, 取 1 h 为一个时间段, 一个周期内共有 24 个 $f_{P,T}$, 每 1 s 采集一次瞬时功率, n 等于 3600。方差反映了功率波动分散程度, 数值越大表示功率波动复位缓慢, 主动控制效果较差。

5 仿真分析

为了验证 ADN 辅助共享机制控制模式的实用性, 本文利用 PowerFactory 软件对实际配网线路进行仿真分析。限于篇幅, 详细分析馈线 1 正常、故障情况以及馈线 1 全天统计结果, 三线同时波动情况仅简要分析。外电网等效为无限大电源, 配电网线路结构图如图 4 所示, 参数如表 1 所示。

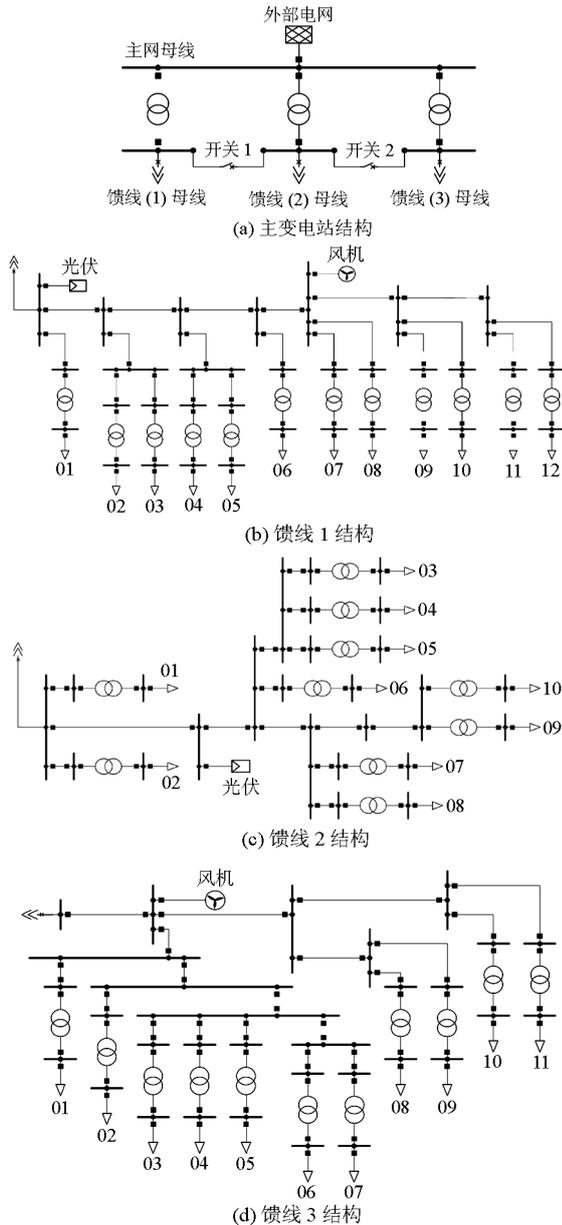


图 4 仿真馈线结构

Fig. 4 Structure of simulated feeders

表 1 配电网线路参数

Table 1 Line parameters of distribution network

馈线	长度	主干线型号	供电分区	节点数	配变容量
(1)	4.8 km	LGJ-240	A	12	8 MVA
(2)	4.2 km	LGJ-240	B	10	7 MVA
(3)	3.5 km	LGJ-185	C	11	6 MVA

馈线	最大负荷	DG 位置	光伏	风电	可调负荷容量
(1)	6.2 MW	1/7 母	3 MW	5 MW	1 MW
(2)	5.3 MW	2 母	6 MW	无	1 MW
(3)	4.5 MW	1 母	无	5 MW	0.5 MW

馈线	死区	正常调节	紧急调节
(1)	0~0.01 MW	0.01~1 MW	大于 1 MW
(2)	0~0.01 MW	0.01~1 MW	大于 1 MW
(3)	0~0.01 MW	0.01~0.5 MW	大于 0.5 MW

5.1 正常情况

根据 3.1 节, 配网中各线路独立完成恒定功率控制, 目标使线路首端功率按照计划值流动。9:00, 馈线 1 计划的下网有功功率 $P_{i,0}$ 为 1 MW, 本地光伏出力为 0.8 MW, 风电出力为 2.2 MW, 馈线总负荷为 4 MW, 外网向馈线 1 供电 1 MW, 馈线误差 $P_{DEV,1}$ 为 0。设定馈线 1 的负荷 07 在 $t=2$ s 时由 0.32 MW 增至 0.48 MW, $t=4$ s 时恢复原值。馈线 1 可调负荷变化如图 5 所示, 线路下网功率和功率误差见图 6。

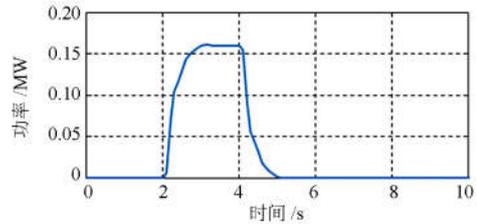


图 5 馈线 1 可调负荷功率曲线

Fig. 5 Power curve of adjustable loads of feeder 1

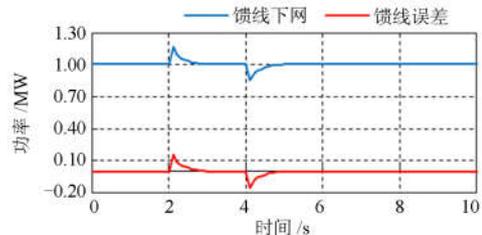


图 6 正常时下网功率和馈线误差曲线

Fig. 6 Power curve of input power and error in normal time

由图 5 和图 6 可知, 馈线 1 可调负荷响应负荷 07 变化, 输出 0.16 MW 补偿馈线误差。由于是短时功率缺额, 调度秒级储能装置, 最快动作时间为 1 s。当 $t=3$ s 时 $P_{DEV,1}$ 才重新回零。负荷在 $t=4$ s 时恢

复正常, 可调负荷停止出力, 动作时间为 1 s, P_{DEV-1} 于 $t=5$ s 时重新回零。

5.2 故障情况

16:00, 馈线 1 计划的线路下网有功功率 $P_{1,0}$ 为 2 MW, 本地光伏出力为 0.9 MW, 风电出力为 1.8 MW, 馈线总负荷为 4.7 MW, 外网向馈线 1 供电 2 MW, 馈线误差 P_{DEV-1} 为 0。仿真设定馈线 1 的负荷 09—12 在 $t=2$ s 时因线路短路故障跳闸停电, 线路总负荷减少 1.6 MW, $t=6$ s 时故障消除。由于馈线误差超过正常调节阈值, 改由中央控制系统调控, 借调馈线 2 可调负荷 0.4 MW 和馈线 3 可调负荷 0.2 MW。相关可调负荷变化如图 7 所示, 线路下网功率和功率误差见图 8。

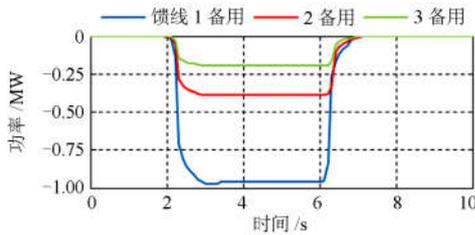


图 7 三线可调负荷功率曲线

Fig. 7 Power curve of adjustable loads of three feeders

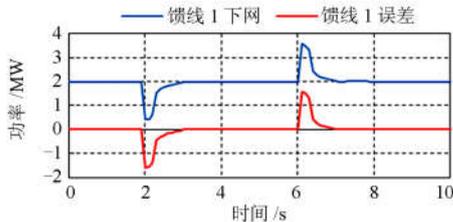


图 8 故障时下网功率和馈线误差曲线

Fig. 8 Power curve of input power and error in fault time

由图 7 可知, 三线可调负荷响应故障, 同理调度秒级储能吸收 1.6 MW 功率, 消除馈线误差。如图 8 所示, $t=3$ s 时 P_{DEV-1} 重新回零; 故障在 $t=6$ s 时解除, 由于响应惯性, P_{DEV-1} 于 $t=7$ s 时回零。

5.3 全天统计

对馈线 1 进行全天统计, 各时段负荷波动, 波动占总负荷比例(总负荷按时段变化)和持续时间如表 2 所示(异常均在持续时间后恢复正常)。图 9 对比了本方法主动控制和不控制(由于异常总能恢复正常, 因此设置不控制的情况为馈线不调用备用资源, 经受波动冲击)的波动方差。

由图 9 可知, 本方法积极主动调度馈线 1 可调负荷跟踪功率波动, 使得 P_{DEV-1} 经常处于零位。若馈线出现更长时间、更大负荷的功率变化, 主动补偿效果将会更加明显。

表 2 馈线 1 全天功率波动

Table 2 Power fluctuation in all day of feeder 1

时段	持续时间	负荷波动/kW	占总负荷比例	时段	持续时间	负荷波动/kW	占总负荷比例
0	2 s	50	1.36%	12	3 s	100	1.92%
1	2 s	60	1.78%	13	2 min	200	4.04%
2	2 s	50	1.50%	14	10 s	800	15.74%
3	2 s	80	2.74%	15	2 s	700	15.73%
4	2 s	90	3.11%	16	4 s	1600	34.19%
5	4 s	100	3.45%	17	2 s	100	2.09%
6	4 s	100	3.53%	18	9 min	120	2.14%
7	2 s	150	5.34%	19	2 s	150	2.42%
8	10 s	120	3.91%	20	3 min	300	5.59%
9	2 s	160	4.02%	21	2 s	200	4.57%
10	4 min	120	2.70%	22	2 s	100	2.56%
11	1 min	500	10.53%	23	2 s	80	2.14%

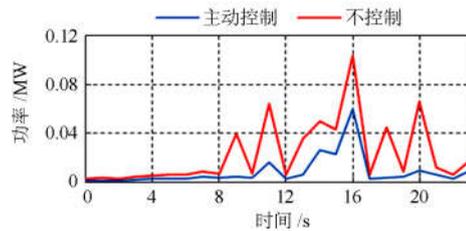


图 9 馈线 1 主动控制和不控制的波动方差对比

Fig. 9 Comparison of $f_{p,T}$ between active control and no control

5.4 三线波动

为进一步说明本控制模式的有效性, 设置下午 14 点三条线路负荷波动。馈线 1 的负荷 05 在 $t=2$ s 时激增 0.8 MW, $t=10$ s 时恢复原值; 馈线 2 的负荷 03 在 $t=3$ s 时由于线路跳闸, 总负荷下降 0.2 MW, $t=7$ s 时异常消失; 馈线 3 的负荷 08 在 $t=4$ s 时激增 0.7 MW, $t=9$ s 时恢复原值。可调负荷变化见图 10。

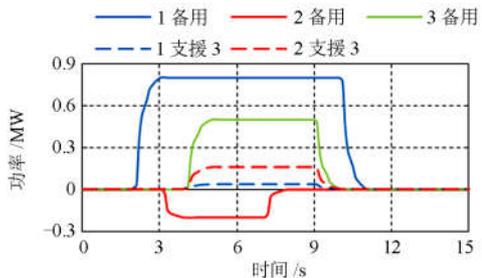


图 10 可调负荷功率曲线

Fig. 10 Power curve of adjustable loads of three feeders

由表 1 可知, 馈线 1 和馈线 2 负荷波动处于正常调节范围, 因此馈线 1 可调负荷输出 0.8 MW 补偿缺额, 馈线 2 可调负荷吸收 0.2 MW 过剩功率。馈

线3 负荷波动处于紧急调节范围($0.7 \text{ MW} > 0.5 \text{ MW}$), 超出的 0.2 MW 由馈线 1 空余可调负荷支援 0.04 MW , 由馈线 2 空余可调负荷支援 0.16 MW , 分配原则根据事故空余容量系数决定。经过上述动作, 3 条馈线在负荷值波动时, 均能保证各自 P_{DEV} 时常处于零位, 负荷波动冲击减弱, 达到控制目标。

6 结论

这场以能源革命为主的电力改革是打破旧传统, 构建新体系的深刻变革。配网不论是控制模式还是技术路线都将发生重大转变, 其中辅助服务共享将是实现其智能化的关键内容之一。利用可调负荷作为 AS 提供备用, 提出了相应的 ADN 控制模式, 通过理论和算例分析, 可以得到以下结论:

1) 多层次控制结构符合未来主动配电网发展要求, 也是国内外相关研究的重点。本控制模式有效避免了集中控制扩展性差的缺陷, 也减少了网络信息传输拥堵的问题。

2) 设定的 3 个控制阈值, 减少了提供辅助服务的备用设备启停次数, 且能及时消除故障。

3) 充分利用配网可调负荷, 符合国家下一步电力市场发展方向, 将会促进中国电力改革进程。

参考文献

- [1] The Central People's Government of the People's Republic of China[EB/OL]. [2015-11-30]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-11/30/content_5018218.htm.
- [2] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12-18.
- [3] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 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.
- [4] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [5] BLUM D H, ZAKULA T, NORFORD L K. Opportunity cost quantification for ancillary services provided by heating, ventilating, and air-conditioning systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(3): 1264-1273.
- [6] 陆凌蓉, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 43-49.
LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 43-49.
- [7] GUBINA A F, TUERK A, PUCKER J, et al. Policy framework conditions for provision of ancillary services in a distribution network by distributed RES generation[C] // PowerTech, Eindhoven, 2015: 1-6.
- [8] VATU R, CEAKI O, MANCASI M, et al. Analysis of ancillary services within smart grid framework[C] // Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, 2015: 1-5.
- [9] 胡勇. 主动配电网用户侧能量管理系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 149-155.
HU Yong. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 149-155.
- [10] 蒲天骄, 李焯, 陈乃仕, 等. 基于 MAS 的主动配电网多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 67-75.
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network based on multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 67-75.
- [11] 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.
- [12] 钟清, 张文峰, 周佳威. 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. Hierarchical and distributed control strategy for active distribution network & its implementation[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1511-1517.
- [13] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al.

- Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids — a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 42(1): 158-172.
- [14] LU X N, GUERRERO J M, SUN K, et al. Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 683-692.
- [15] 马莉, 范孟华, 郭磊, 等. 国外电力市场最新发展动向及其启示[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 1-9.
MA Li, FAN Menghua, GUO Lei, et al. Latest development trends of international electricity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 1-9.
- [16] CECATI C, CITRO C, SIANO P. Combined operations of renewable energy systems and responsive demand in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 468-476.
- [17] ZHAO J H, WANG C S, ZHAO B, et al. A review of active management for distribution networks: current status and future development trends[J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(3/4): 279-293.
- [18] SAMUELSSON O, REPO S, JESSLER R, et al. Active distribution network-demonstration projection ADINE [C] // Proceedings of the 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Gothenburg, Sweden, 2010: 1-8.
- [19] FARAG H E, EL-SAADANY E F, CHAAR L E. A multilayer control framework for distribution systems with high DG penetration[C] // Proceedings of the 2011 International Conference on Innovations in Information Technology, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2011: 94-99.
- [20] 艾欣, 陈炜. 考虑容量管理的主动配电网市场化实时竞价运营模式[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3743-3749.
AI Xin, CHEN Wei. Marketization real-time bidding operation mode of the active distribution network with consideration of capacity management[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3743-3749.
- [21] JIANG Z H, DOUGAL R A. Hierarchical microgrid paradigm for integration of distributed energy resources[C] // Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, 2008: 1-8.
- [22] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0012-2
-
- 收稿日期: 2016-10-26; 修回日期: 2017-01-09
作者简介:
李滨(1975—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统最优化; E-mail: lizhen@gxu.edu.cn
李星辰(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优运行与规划; E-mail: liyfhwz@163.com
阳育德(1971—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化理论及计算。E-mail: yangyude@gxu.edu.cn
(编辑 周金梅)