

主动配电网分层分布控制策略及实现

钟清¹, 张文峰¹, 周佳威², 刘东², 陈炯聪¹, 陈云辉²

(1. 广东电网有限责任公司, 广东省 广州市 510080;

2. 电力传输与功率交换控制教育部重点实验室(上海交通大学 电气工程系), 上海市 闵行区 200240)

Hierarchical and Distributed Control Strategy for Active Distribution Network & Its Implementation

ZHONG Qing¹, ZHANG Wenfeng¹, ZHOU Jiawei², LIU Dong², CHEN Jiongcong¹, CHEN Yunhui²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, Guangdong Province, China;

2. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University), Ministry of Education, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: With the integration of distributed generation (DG) and energy storage system (ESS), the real-time performance of centralized management is poor in distribution network. Therefore, a three-layer control structure, dividing active distribution network (ADN) into regions, is proposed and each region is equipped with several coordinate controllers for autonomous control. According to the indicator of feeder control error (FCE), the control mechanism, which eliminates the differences between real-time operating status and global optimized status, is established and the models of hierarchical and distributed controller and source-network coordinate controller are proposed. Three kinds of control mode, the constant feeder exchange power mode, regional autonomous control mode and regional cooperative control mode, are put forward to adapt to different occasions. The effectiveness and validity of ADN hierarchical and distributed control strategy is verified with the simulation in an ADN demonstration site in Guangdong.

KEY WORDS: active distribution network; distribution energy resources; feeder control error; hierarchical and distributed control; regional controller

摘要: 配电网大量接入分布式电源和储能装置后, 集中式的管理模式实时性较差, 因此文章提出3层控制结构, 将主动配电网进行区域划分, 并在每个区域中配置协调控制器进行区域自治控制。根据馈线控制误差(feeder control error, FCE)指标, 建立了实时平抑区域运行状态与最优目标之间差异的区域控制机制, 据此提出了分层分布控制器与源网协调控制器的模型。根据FCE指标的不同形式, 提出馈线定交换功率、区域独立自治和区域协同自治3种控制模式, 以适应不同电网需求。最后通过广东某主动配电网示范现场算例的仿真分析, 验证了所提分层分布控制策略的合理性和有效性。

关键词: 主动配电网; 分布式能源; 馈线控制误差; 分层分

布控制; 区域控制器

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2015.06.007

0 引言

当传统配电网接入分布式电源、储能装置以及可控负荷等分布式能源(distributed energy resources, DER)后, 配电网就拥有了主动调节能力。分布式能源接入配电网的优势包括经济效益、环境效益以及配电网可靠性提高等, 但也带来许多问题, 比如电能质量、继电保护以及双向潮流问题。为充分利用这些优势并克服其带来的问题, 适应配电网中DER大量接入的新型控制模式逐渐被提出并得到应用。

CIGRE C6.11工作组的工作报告中提出了主动配电网(active distribution network, ADN)的定义: 可以综合控制分布式能源(DG、柔性负载和储能)的配电网, 并使用灵活的网络技术实现潮流的有效管理, 分布式能源在其合理的监管环境和接入准则基础上承担对系统一定的支撑作用^[1]。因此可以将具有组合控制各种分布式能源能力的配电网称作主动配电网^[2]。

近些年, 对于主动配电网的研究在国外逐渐兴起, 且愈发深入, 文献[3-4]基于最优潮流(optimal power flow, OPF)算法, 以配电网运行总成本最小为目标, 对配电网中可控单元(OLTC、分布式能源、可控负荷)进行组合配置, 在满足各种约束条件的基础上完成对配电网的运行优化控制。文献[5]通过测量网络关键节点电压来判断配网电压是否越限, 一旦越限优先调节有载调压变压器, 无法将节点调节至预设范围内时再调节分布式能源无功和有功出力, 直至电压恢复正常, 调节节点的选择由电压灵敏矩阵提供, 在此基础上运用多断面模型预测控制

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划项目(2012AA050212)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2012AA050212) .

的算法更加切合电网连续运行的场景^[6]。此外，关于主动配电网的规划配置^[7-10]、经济效益评估^[11-13]、保护^[14-16]等方面也有较多的研究。

以上对主动配电网的各方面研究都是基于整体层面，而针对可再生能源变化快、难预测的特点，整体优化的速度难以满足电网对实时性的要求。本文根据文献[17]提出的分层管理理念，提出对主动配电网进行区域划分^[18]，由全局优化算法制定长时间尺度的整体与区域优化目标，区域内根据文献[19]提出的馈线控制误差(feeder control error, FCE)指标进行实时的自我协调优化控制，并由此提出区域控制的多种模式及其相应控制方程。通过建立区域控制器实现区域内协调控制算法，为实际装置开发提供依据。最后通过理论分析以及仿真进行验证。

1 分层分布控制策略

全局优化管理系统向各个自治区域下发局部目标值，自治区域根据特定的自治控制策略，实时响应外界扰动，协调控制区域内部的分布式能源(DG和储能；为保证完全消纳光伏与风力发电，不对其进行功率调控)，使得整个系统的运行更加趋近于全局目标优化值。主动配电网外部可近似为无穷大电源，以维持电网功率平衡。

下面以图1所示的简单例子说明主动配电网分层分布控制策略。本文参考文献[19]提出的FCE概念，形成了区域*i*自治控制的目标函数：

$$P_{FCEi} = k_i \cdot \Delta P_F + \Delta P_{\text{area}-i} = 0 \quad (1)$$

式中： P_{FCEi} 为区域*i*馈线控制误差； k_i 为区域*i*参与的功率协调系数； ΔP_F 为馈线实际交换功率与其优化目标值的偏差，其值 $\Delta P_F = P_F - P_F^{\text{opt}}$ ， P_F 为馈线实际交换功率(流入为正)， P_F^{opt} 为馈线交换功率目标值； $\Delta P_{\text{area}-i}$ 为自治区域*i*交换功率实际值与其优化目标值的偏差，其值 $\Delta P_{\text{area}-i} = P_{\text{area}-i} - P_{\text{area}-i}^{\text{opt}}$ ， $P_{\text{area}-i}$ 为区域*i*交换功率的实际值， $P_{\text{area}-i}^{\text{opt}}$ 为区域*i*交换功率目标值。 k_i 、 P_F^{opt} 和 $P_{\text{area}-i}^{\text{opt}}$ 都是经全局优化算法计算后得到的目标值。

由图1可知，每个区域的功率交换值 $P_{\text{area}-i}$ 均由 $P_{\text{in}-i} - P_{\text{out}-i}$ 得到， $P_{\text{in}-i}$ 为流入区域功率值(流入为正)， $P_{\text{out}-i}$ 为流出区域功率值(流出为正)。由图1可知，每个区域的功率交换值 $P_{\text{area}-i}$ 均由 $P_{\text{in}-i} - P_{\text{out}-i}$ 得到， $P_{\text{in}-i}$ 为流入区域功率值(流入为正)， $P_{\text{out}-i}$ 为流出区域功率值(流出为正)。由图1可知，每个区域的功率交换值 $P_{\text{area}-i}$ 均由 $P_{\text{in}-i} - P_{\text{out}-i}$ 得到， $P_{\text{in}-i}$ 为流入区域功率值(流入为正)， $P_{\text{out}-i}$ 为流出区域功率值(流出为正)。

FCE的提出量化了自治区域实际工作状态以

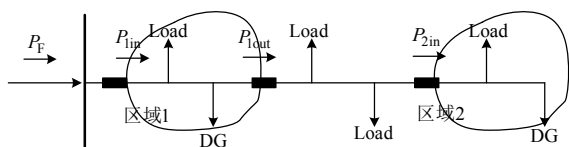


图1 主动配电网分层控制原理

Fig. 1 Principles of ADN hierarchical control

及其承担电网波动的能力。初始状态下，馈线交换功率和区域交换功率均与全局优化目标值相同，即 $P_F = P_F^{\text{opt}}$ 、 $P_{\text{area}-i} = P_{\text{area}-i}^{\text{opt}}$ ，此时FCE为0；当馈线交换功率减小或区域交换功率减小时，FCE小于0，这时区域内DG、储能将减小其输出功率调节FCE至0；反之，当馈线交换功率增加或区域交换功率增加时，FCE大于0，这时区域内DG、储能将增加其输出功率调节FCE至0。区域控制目标就是实时保证FCE等于0，通过FCE值的大小来协调控制区域内的各DG和储能装置，使得电网实际运行状态更加趋近于全局优化目标。而根据不同应用场景，式(1)又可演变出3种不同的控制模式，以下将详细介绍3种控制模式的控制方程及其推导过程。

1.1 馈线定交换功率模式

当式(1)中不考虑区域交换功率偏差时，就变为如下形式：

$$P_{FCEi} = k_i \cdot \Delta P_F = 0 \quad (2)$$

此时区域交换功率完全根据馈线交换功率的变化而变化，各区域协调完成对馈线交换功率与优化目标之间偏差的消纳，确保主动配电网与外界交换功率保持不变。该模式下，ADN相对于外部电网为一个恒定负荷，对外部电网冲击很小。但全局优化目标中对区域的优化部分在此无法体现，因而此模式仅适用于分布式能源渗透率较低的场合。

1.2 区域独立自治模式

当式(1)中不考虑馈线交换功率偏差时，就变为如下形式：

$$P_{FCEi} = \Delta P_{\text{area}-i} = 0 \quad (3)$$

该模式下自治区域处于完全自治的状态，从全局优化管理系统接收区域交换功率目标值后，不再需要馈线实际交换功率值，当区域内出现负荷或者分布式能源出力波动时，其区域交换功率与目标值偏差由区域自身承担消纳，FCE小于0，则减小分布式能源出力，反之FCE大于0，则增加分布式能源出力。

这样对于某区域内的计划外功率波动，由区域自身完成消纳，对其他区域不产生影响，因此可以将电网功率波动控制在尽量小的范围内。而对于区域外发生的计划外负荷波动等，各自治区域不受影响，变电站母线将全部承担这些波动。这种控制模式下，各区域内部都相对稳定，相互之间无影响，适合网络结构复杂、自治区域多，并且外电网支撑作用可靠的场合。

1.3 区域协同自治模式

主动配电网的优化控制不仅需要考虑馈线与

外电网交换功率,也要兼顾自治区域交换功率,两者综合考虑的模式称为区域协同自治模式。该模式下,当发生功率波动时,各自治区域根据下发的功率协调系数,共同平衡这些计划外的负荷变化。这里分2种情况说明:1) 负荷波动发生在自治区域外;2) 负荷波动发生在自治区域 j 内。

假定功率波动为 ΔP ,忽略线损的影响,对于第1种情况,

$$\Delta P = \Delta P_F - \sum_{i \in N} \Delta P_{\text{area}-i} \quad (4)$$

式中 N 为所有自治区域的集合。当区域协同控制完成后, $P_{\text{FCE}i} = 0$,即 $\Delta P_{\text{area}-i} = -k_i \cdot \Delta P_F$,由此可以推知

$$\Delta P_F = \Delta P / (1 + \sum_{i \in N} k_i) \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{area}-k} = -\frac{k_k \cdot \Delta P}{1 + \sum_{i \in N} k_i} \quad (k \in N) \quad (6)$$

式中 $\Delta P_{\text{area}-k}$ 中的负号代表区域交换功率减小,即区域内分布式能源出力增加。

当非自治区域发生功率扰动 $\Delta P > 0 (< 0)$,为满足功率平衡,馈线交换功率增大(减小) ΔP ,使得各自治区域的FCE值大于(小于)0,各自治区域根据FCE的值增大(减小)区域内分布式能源出力,使 ΔP_F 逐渐减小(增大),直到各自治区域满足 $P_{\text{FCE}i} = 0$,最终功率扰动由变电站母线和所有自治区域共同承担,分担比例为 $\frac{1}{(1 + \sum_{i \in N} k_i)}$ 和 $k_k / (1 + \sum_{i \in N} k_i) (k \in N)$ 。

对于第2种情况,假设功率扰动发生在某个自治区域 j 内,则

$$\Delta P = \Delta P_F - \sum_{i \in N, i \neq j} \Delta P_{\text{area}-i} - \Delta P'_{\text{area}-j} \quad (7)$$

其中 $\Delta P'_{\text{area}-j}$ 为由分布式能源引起自治区域 j 交换功率偏差变化的部分, $\Delta P'_{\text{area}-j} = \Delta P_{\text{area}-j} - \Delta P$,因此

$$\Delta P_{\text{area}-j} = \Delta P_F - \sum_{i \in N, i \neq j} \Delta P_{\text{area}-i} \quad (8)$$

又因为各自治区域调节完成后 $P_{\text{FCE}i} = 0 (i \in N)$,所以有

$$\Delta P_{\text{area}-i} = -k_i \cdot \Delta P_F \quad (i \in N) \quad (9)$$

结合式(8)(9),得到

$$(1 + \sum_{i \in N} k_i) \cdot \Delta P_F = 0 \quad (10)$$

而 $k_i \geq 0 (i \in N)$,所以得到 $\Delta P_F = 0$ 。由此可知

$$\Delta P_{\text{area}-i} = 0 (i \in N) \quad (11)$$

因此,当区域协同自治模式发生自治区域内功率扰动时,其控制效果与区域独立自治模式相同,即发生在自治区域内部的功率扰动由各个自治区

域独立响应。

以上几种模式中,如果某一区域 i 无法完成此时段下发的优化目标,即分布式能源已调节至其限定值,则未完成的调节任务由其他自治区域按照调节系数的比例进行调节。如果达到功率调节限值的自治区域集合为 G ,则

$$\Delta P_F = (\Delta P + \sum_{j \in G} \Delta P_{\text{area}-j}) / (1 + \sum_{i \in N, i \notin G} k_i) \quad (12)$$

未达限值区域承担的功率调节量为

$$\Delta P_{\text{area}-k} = -\frac{k_k \cdot (\Delta P + \sum_{j \in G} \Delta P_{\text{area}-j})}{1 + \sum_{i \in N, i \notin G} k_i} \quad (k \in N, k \notin G) \quad (13)$$

2 区域控制单元

2.1 区域控制单元配置

本文将主动配电网进行3层结构划分(见图2),每一层次都配备相应的控制单元作为策略实现的载体,控制单元的具体结构则是控制策略的细化。

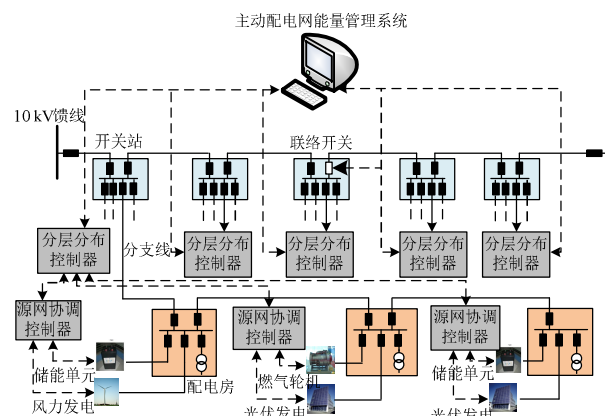


图2 主动配电网分层协调控制框架

Fig. 2 Hierarchical control structure of ADN

1) 全局优化管理系统作为第一层控制,通过其他层次的配合采集整个配电网的运行信息,通过全局优化算法对配电网进行全局层面上的优化控制,对下层区域设定区域优化目标。

主动配电网能量管理系统作为主动配电网的第1层控制单元,也是主动配电网的中枢管理单元,用以实施全局最优算法,优化控制网络所有的可控分布式发电单元、柔性负载单元以及馈线上的联络开关并设定自治区域优化目标。而全局优化算法的具体实现并非本文讨论重点,在此不做赘述。

2) 第2层控制是局部区域自治控制。配电网根据一定规则划分为多个子区域,对区域内部的下层单元进行调度,实现自身区域内部稳定且降低不同区域之间的相互影响,同时减少对配电网的扰动。

区域划分规则:若馈线上2个分段开关间隔内,或单个可控分段开关至线路末端包含可控分布式

电源, 则其作为一个独立自治区域配备区域控制单元^[18]。同一馈线上可能存在多个区域, 区域间通过式(1)的不同变形配合实现对全局优化目标的跟踪。

分层分布控制器作为主动配电网的第2层控制单元, 用以协调控制馈线上一个自治区域内所有的可控分布式发电和储能单元, 分层分布控制器是通过控制其管辖区域内各个源网协调控制器达到区域协调控制的目的。

3) 第3层控制为就地控制, 对同一配电节点上的分布式能源进行调度, 就地控制的特点就是响应速度快。

源网协调控制器作为主动配电网的第3层控制单元, 用以协调控制同一配电节点(配电房或者开闭所)所有的分布式能源和柔性负载(包括储能单元和微网单元)。

2.2 区域控制单元模型

由上一小节论述已知, 主动配电网的局部区域自治控制主要是通过主动配电网分层分布控制器、源网协调控制器以及主动配电网全局能量管理系统相互配合来实现, 其中一个分层分布控制器对应一个自治控制区域, 一个源网协调控制器对应一个配电节点。分层分布控制器协调控制自治区域内包含的所有源网协调控制器, 源网协调控制器协调控制同一配电节点连接的所有可控分布式单元。

因此控制器之间构成的通信网络是一个树状结构, 每一个通信节点只与自己的父节点和子节点通信, 相较于大量分布式能源接入后的集中式管理模式通信网络, 网架结构更加清晰合理, 有效缓解了主站端的通信压力。

分层分布控制器对下用于实时采集区域与馈线的交换功率并按照自治策略协调各自治区域内的源网协调控制器的控制量输入, 对上用于将各个源网协调控制器采集的分布式能源的状态信息汇总后上传给主动配电网能量管理系统。其模型见图3, 实时计算FCE值并与设定目标值0进行比较; DeadBand为死区处理模块, 用以过滤微小的误差, 防止控制值频繁波动; Delay为通信延迟模块; 通过PI控制模块后将各控制值按设定的分配比例传送给相应源网协调控制器, 分布式能源出力调节进而影响下一次FCE值的计算, 从而形成闭环控制。

源网协调控制器的职能则是根据分层分布控制器的输入指令协调其负责控制的分布式能源的功率输出, 对上则负责将采集到的分布式发电单元运行状态数据发送给分层分布控制器。其模型如图4所示, 同一源网协调控制器下的分布式能源

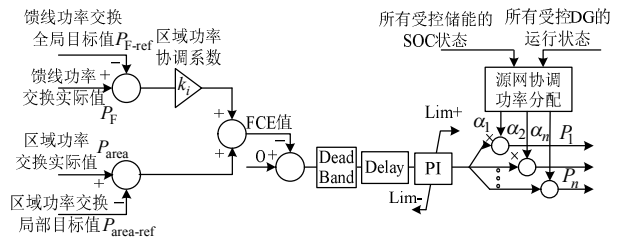


图3 分层分布控制器模型

Fig. 3 Model of hierarchical and distributed controller

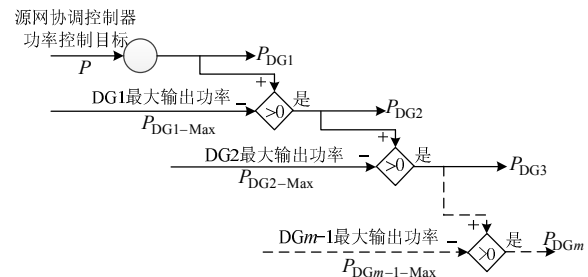


图4 源网协调控制器模型

Fig. 4 Model of source-network coordinate controller

按照优先级原则进行功率调控。

控制单元模型将第1节所述的控制方程融入其中, 为后续仿真模型搭建以及日后实际装置开发都奠定了坚实的基础, 将理论推演赋予实际意义。

3 仿真分析

选取某主动配电网示范现场算例进行仿真分析, 以验证本文提出的主动配电网分层分布控制策略以及控制单元模型, 对上文所述的馈线定交换功率模式、区域独立自治模式和区域协同自治模式3种控制模式进行考证。算例拓扑连接如图5所示, 取其中2个区域进行分析, 区域控制器按照图3和图4搭建, 外电网等效成无穷大电源。

为提高可再生能源利用率和环境效益, 保证光伏与风力发电完全消纳, 对其发出功率全部上网不加限制, 区域内其他类型DG情况见表1。各节点负荷数据见表2, 其中萧海线负荷3作为区域内负荷波动点, 其他负荷作为区域外负荷波动点。馈线交换功率以及各区域交换功率目标值和功率协调系数见表3。

3.1 馈线定交换功率模式

此种模式下, 区域内、外功率波动均由各区域按功率协调系数承担, 因此只需仿真一种情况。仿真设定萧海线负荷3在 $t=3\text{ s}$ 时有功率增加0.226 MW, 在 $t=5\text{ s}$ 时有功率减小0.226 MW。

仿真结果如图6所示, $t=3\text{ s}$ 时功率波动导致馈线交换功率增加, 各区域根据功率协调系数完成对波动消纳后, 馈线交换功率回到原值。 $t=5\text{ s}$ 时发生的功率波动也同样被各自治区域所消纳, 实现馈线定交换功率控制模式。

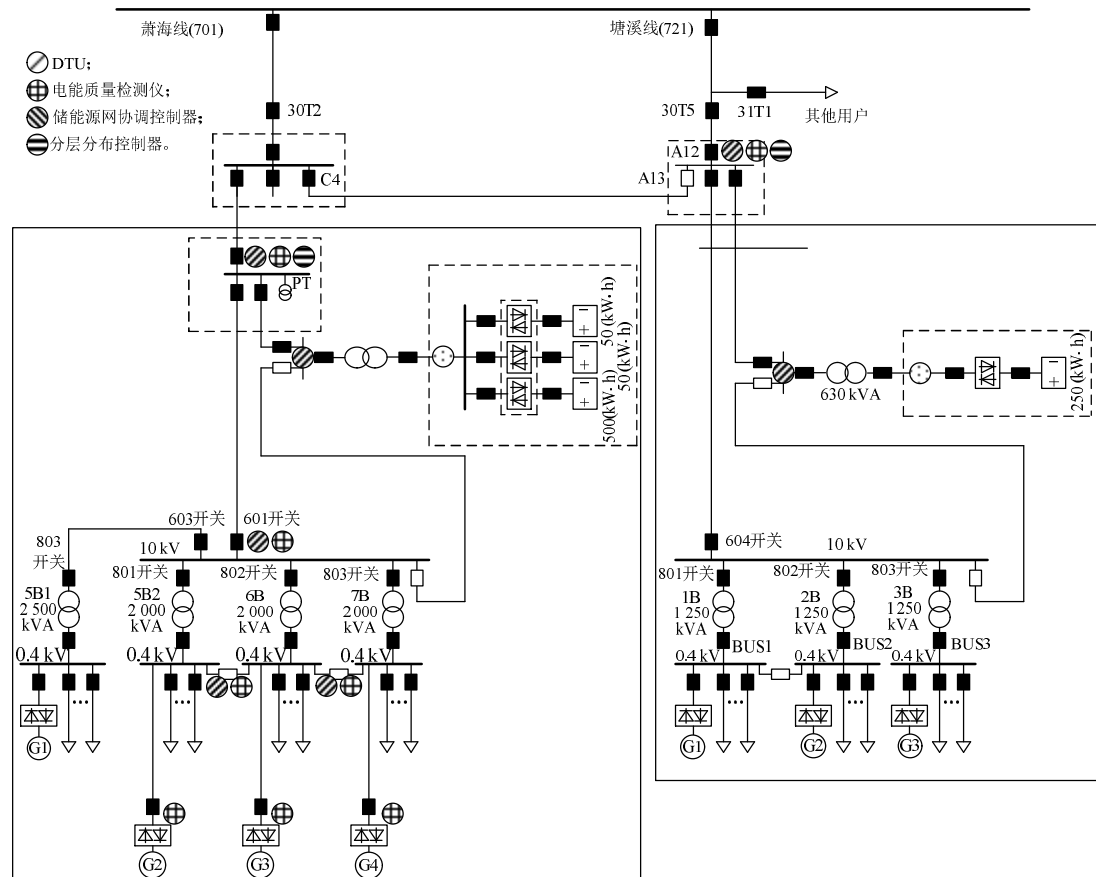


图5 算例电网拓扑连接

Fig. 5 Topological connection of the grid

表 1 分布式能源配置情况		
Tab. 1 Distribution generation configuration		
类型	所在区域	容量/(kW·h)
萧海线储能	萧海线区域	600
塘溪线储能	萧海线区域	250

表 2 各负荷、光伏功率			
Tab. 2 Power load and PV output			
负荷	有功功率/MW	光伏出力	有功功率/MW
萧海线负荷 1	0.812	萧海线光伏 1	0.247
萧海线负荷 2	0.728	萧海线光伏 2	0.224
萧海线负荷 3	0.754	萧海线光伏 3	0.224
萧海线负荷 4	0.863	萧海线光伏 4	0.224
塘溪线负荷 1	0.126	塘溪线光伏 1	0.112
塘溪线负荷 2	0.134	塘溪线光伏 2	0.112
塘溪线负荷 3	0.115	塘溪线光伏 3	0.112
其他负荷	0.475	塘溪线光伏 4	0.022

表 3 变电站母线、各自治区域交换功率目标值及其功率协调系数		
Tab. 3 Targets of feeder and region exchange power and coordinative coefficient		
区域	目标值/MW	协调系数
变电站母线	2.66	
萧海线区域	2.15	0.706
塘溪线区域	0.02	0.294

3.2 区域独立自治模式

根据第 1 节, 区域独立自治模式下, 区域内功率波动由本区域完全承担, 区域外功率波动由馈线交换功率承担。区域内功率波动仿真结果见图 7, 萧

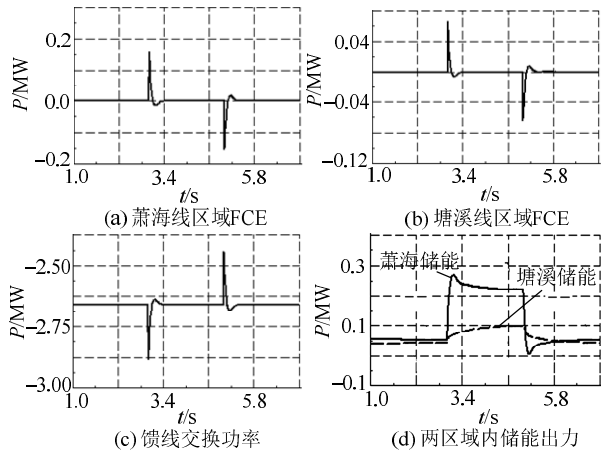


图6 馈线定交换功率模式仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of constant feeder exchange power mode

海线负荷 3 在 $t=3$ s 时有功功率增加 0.226 MW, 在 $t=5$ s 时有功功率减小 0.226 MW; 区域外功率波动仿真结果见图 8, 塘溪线其他负荷在 $t=3$ s 时有功功率增加 0.143 MW, 在 $t=5$ s 时有功功率减小 0.143 MW。

由图 7 可知, 区域独立自治模式下萧海线区域内发生功率波动完全由自治区域内分布式能源完成消纳, 馈线交换功率和其他区域状态在调控完毕后不发生改变。

由图 8 可知, 当自治区域外发生功率波动, 区

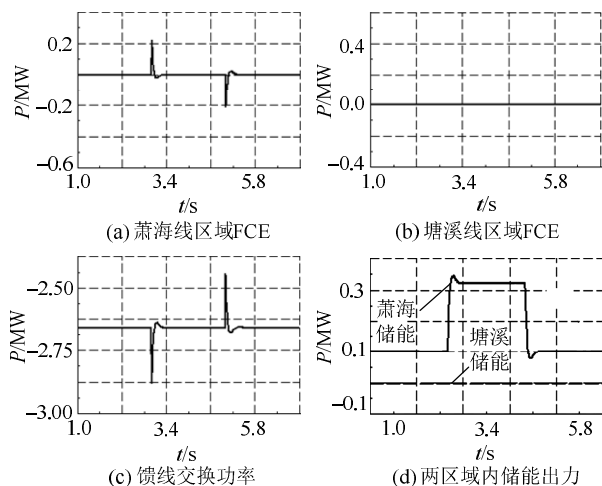


图7 区域独立自治模式区域内波动仿真曲线

Fig. 7 Intra-region fluctuation simulation curves of regional autonomous control mode

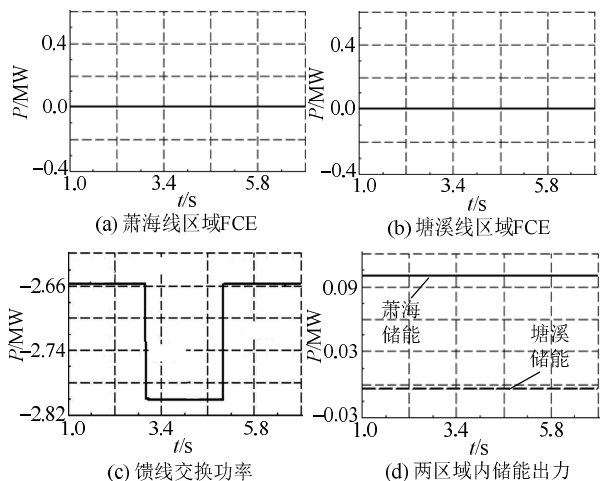


图8 区域独立自治模式区域外波动仿真曲线

Fig. 8 Extra-region fluctuation simulation curves of regional autonomous control mode

域独立自治模式完全由变电站母线承担这部分功率波动。与第1节理论推导结果相符。

3.3 区域协同自治模式

该控制模式下对自治区域内功率波动和区域外功率波动的控制效果同样存在差别, 采用与3.2节相同的波动情况进行仿真, 区域内功率波动仿真结果见图9, 区域外功率波动仿真结果见图10。

由图9可知, 区域协同自治模式下发生自治区域内功率波动的调控结果与区域独立自治模式相同, 只是调控过程初始各自治区域都参与其中。

图10以 $t=3$ s 时功率波动调控数据为例, 塘溪线其他负荷有功功率增加 0.143 MW, 稳定后馈线交换功率增加 0.071 MW, 萧海线储能增加 0.051 MW, 塘溪线储能增加 0.02 MW, 功率调节量与式(5)(6)的计算结果完全一致, 验证了理论推导的正确性。

图11验证了波动过大区域无法调节的情况, 当萧海线负荷3在 $t=3$ s 时功率增大 0.226 MW, 在 $t=5$ s 时功率增大 0.377 MW, 此时萧海线区域储能

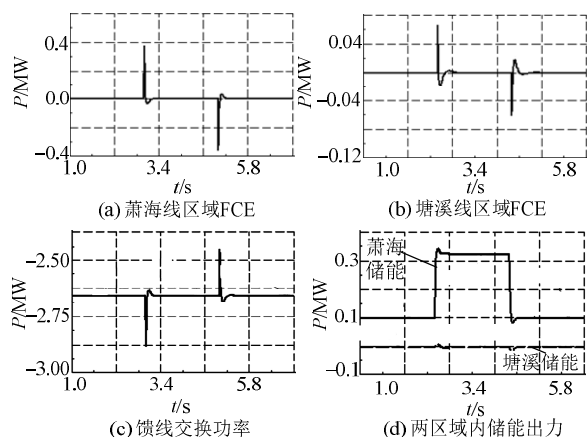


图9 区域协同自治模式区域内波动仿真曲线

Fig. 9 Intra-region fluctuation simulation curves of regional cooperative control mode

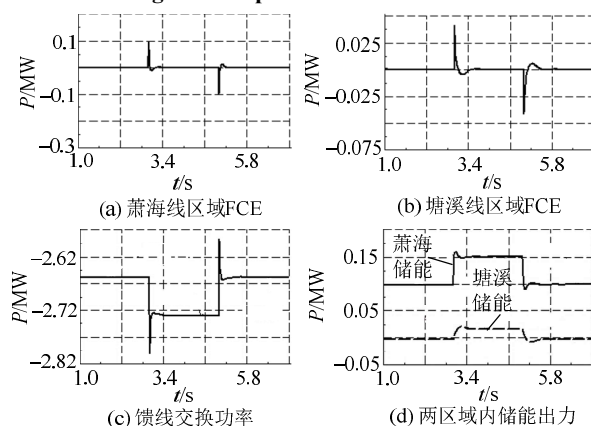


图10 区域协同自治模式区域外波动仿真曲线

Fig. 10 Extra-region fluctuation simulation curves of regional cooperative control mode

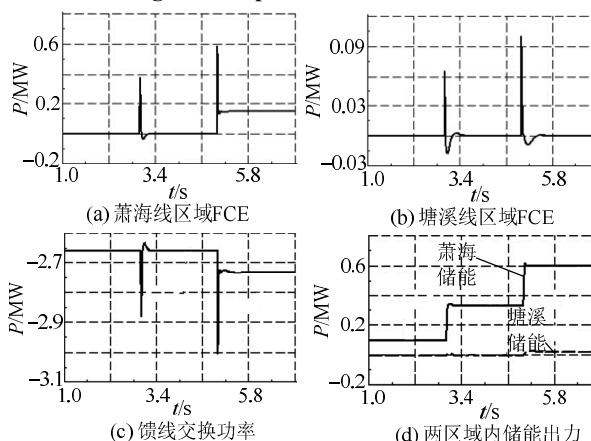


图11 区域协同自治模式区域内波动过大仿真曲线

Fig. 11 Intra-region excessive fluctuation simulation curves of regional cooperative control mode

无法平抑该波动, 由馈线与塘溪线区域进行调节。馈线交换功率增加 0.074 MW, 塘溪线储能增加了 0.022 MW, 调节量与式(12)(13)的计算结果完全一致。

以上各种控制模式下的仿真结果均与第1节理论分析的结果完全一致, 验证了本文提出的分层分布控制策略的正确性, 为FCE值作为控制目标的区域自治策略提供了理论依据, 验证了区域控制单元模型的有效性。

4 结论

1) 大规模 DG 接入对传统配电网带来了新挑战, 本文将主动配电网分为 3 层控制结构, 进行区域自治控制, 有效规避了集中式控制实时性差的问题。

2) 应用 FCE 量化描述了主动配电网实际状态与全局优化状态之间的差异, 在不同控制模式下, 跟踪可再生能源实时出力, 协调区域内可控 DG 运行, 平抑馈线交换功率或区域交换功率偏差, 实现了主动配电网全局优化基础上的局部协调控制。

3) 配电网分区控制为主动配电网对分布式电源的有功功率控制和管理提供了一种有效控制方法, 有关区域无功控制将在后续工作中进一步研究。

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]// 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1, CIRED 2009. Prague, Czech Republic: 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 (in Chinese).
- [3] Pilo F, Pisano G, Soma G G. Advanced DMS to manage active distribution networks[C]//PowerTech, 2009 IEEE Bucharest. Bucharest: IEEE, 2009: 1-8.
- [4] Peikherfeh M, Seifi H, Sheikh-El-Eslami M K. Active management of distribution networks in presence of distributed generations[C]//2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). Ischia: IEEE, 2011: 725-729.
- [5] Viehweider A, Bletterie B, Burnier de Castro D. Advanced coordinated voltage control strategies for active distribution network operation[C]// 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution-Part 1, CIRED 2009. Prague: IET, 2009: 1-4.
- [6] Valverde G, Van Cutsem T. Model predictive control of voltages in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2152-2161.
- [7] Celli G, Soma G G, Pilo F, et al. Comparison of planning alternatives for active distribution networks[C]//Integration of Renewables into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop. Lisbon: IET, 2012: 1-4.
- [8] Nick M, Hohmann M, Cherkaoui R, et al. On the optimal placement of distributed storage systems for voltage control in active distribution networks[C]//2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Berlin: IEEE, 2012: 1-6.
- [9] Martins V F, Borges C L T. Active distribution network integrated planning incorporating distributed generation and load response uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2164-2172.
- [10] 方陈, 张翔, 程浩忠, 等. 主动管理模式下含分布式发电的配电网网架规划[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 823-829.
Fang Chen, Zhang Xiang, Cheng Haozhong, et al. Framework planning of distribution network containing distributed generation considering active management[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 823-829(in Chinese).
- [11] Hu Z, Li F. Cost-benefit analyses of active distribution network management, part I: annual benefit analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1067-1074.
- [12] 卢志刚, 马丽叶. 配电网经济运行评价指标体系的建立[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 108-112.
Lu Zhigang, Ma Liye. Establishment of evaluation index system for economic performance of distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 108-112(in Chinese).
- [13] 张金国, 焦东升, 王小君, 等. 基于梯级利用电池的储能系统经济运行分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2551-2555.
Zhang Jinguo, Jiao Dongsheng, Wang Xiaojun, et al. Analysis on economic operation of energy storage based on second-use batteries[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2551-2555(in Chinese).
- [14] Belloni F, Chiumeo R, Gandolfi C, et al. A protection coordination scheme for active distribution networks[C]//Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International. London: IEEE, 2012: 1-6.
- [15] 许偃轩, 陆于平, 章桢, 等. 分布式发电配电网新型充分式保护原理及方案[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2532-2537.
Xu Sixuan, Lu Yuping, Zhang Zhen, et al. Principle and implementation of a novel sufficient criterion protection for distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2532-2537(in Chinese).
- [16] 李凤婷, 李智才. 含异步机风电场的配电网故障特性及其保护分析[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 981-986.
Li Fengting, Li Zhicai. Analysis on impacts of asynchronous wind farm on fault current characteristics and protective relaying of distribution network[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 981-986(in Chinese).
- [17] 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 CESS, 2014, 34(31): 5500-5506(in Chinese).
- [18] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 多时间尺度下基于主动配电网的分布式电源协调控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 192-198.
You Yi, Liu Dong, Zhong Qing, et al. Multi-time scale coordinated control of distributed generators based on active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 192-198 (in Chinese).
- [19] 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 CESS, 2013, 33(13): 108-115(in Chinese).



钟清

收稿日期: 2014-12-09.

作者简介:

钟清(1965), 女, 教授级高级工程师, 主要研究方向为智能电网、电网规划、新能源技术, E-mail: zhongqing@gddky.csg.cn;

张文峰(1967), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行与管理, 智能电网, E-mail: 23608123@qq.com;

周佳威(1990), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网、主动配电网, E-mail: zhoucanapes@hotmail.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, 主要研究方向为智能配电网、电网信息物理融合系统, E-mail: dongliu@sju.edu.cn;

陈炯聪(1979), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为智能电网、电力系统自动化, E-mail: 478072603@qq.com;

陈云辉(1991), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网、主动配电网, E-mail: bdlcyh@sju.edu.cn.

(责任编辑 李兰欣)