

# 主动配电系统协调控制与优化技术研究与应用

李海涛

(广东电网有限责任公司, 广东 广州 510600)

**摘要:**环保问题的日益严峻驱动着清洁能源的开发与利用,在不久的将来,分布式发电将高渗透并网,给配网的运行控制带来一系列挑战。本文将重点研究主动配电系统的源-网-荷协调控制架构和优化控制方法,实现分布式新能源在配电网的分层高效消纳,并确保配网的安全经济运行,解决配电网与分布式电源高渗透接入后的兼容性问题。最后通过主动配电系统协调控制技术的仿真计算验证其可行性和有效性。

**关键词:**清洁能源; 分布式发电; 主动配电系统; 源-网-荷协调控制; 优化控制

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)04-0014-07

## 0 引言

随着全球经济对能源需求的不断增长,传统能源紧缺以及环境污染不断恶化等问题驱动智能电网技术的持续发展与进步,未来智能电网需要设计成具有“兼容”、“自愈”、“集成”、“优化”等特征的绿色电网<sup>[1]</sup>。与此同时,电力电子技术和自动控制技术的同步发展促进了以风能、太阳能、生物质能为代表的清洁、可再生能源发电技术的快速发展,这些清洁的可再生能源大部分以分布式发电(Distributed Generation, DG)的形式连接到配电网,与大电网互为补充,是实现能源结构调整和环境保护的重要措施<sup>[2-4]</sup>。但目前配电网仍存在网架薄弱、自动化水平不高以及调度方式落后等问题,分布式能源大都还停留在用作紧急备用电源的被动运行模式,将分布式能源规模化接入配电网并实现调度控制和主动消纳还有很多技术问题亟待解决<sup>[5,6]</sup>。

由于配电网与分布式能源缺乏有效互动,分布式能源大规模并网后的主要问题表现在如下三方面:(1) 分布式能源与配电网刚性连接,配电网运行异常时导致分布式电源停机停运,降低分布式能源的利用效率;(2) 分布式能源大规模并网时,出力的不确定性加剧配电网功率波动和电压波动,导致配电网电能质量等运行问题;(3) 现有配电网缺乏对分布式能源的调节能力,导致配电网峰谷差加大,设备利用率进一步降低。

主动配电网是解决上述问题的有效方案,其允许分布式能源在一定准则基础上自由接入,并将接入的分布式能源以及其他分布式资源包括无功电

源、联络开关等统筹纳入到调度管理系统中实现主动控制,分布式能源不再仅仅是物理上的简单连接。基于主动配电网的协调控制,一是协调控制各分布式电源的有功输出,确保网络运行的经济性;二是协调控制各分布式电源以及无功源的无功输出,确保网络的电压质量。此外,在主动配电网协调控制过程中还要考虑负荷需求以及间歇式能源功率波动的频繁扰动,确保网络运行的鲁棒性。目前对于主动配电网协调控制理论和方法的研究尚处于起步阶段,亟需研究与建立系统完整的主动配电网源-网-荷协调控制架构及方法。

## 1 主动配电网分层协调控制架构

主动配电网通过灵活的网络拓扑以及分布式电源的协同控制对分布式电源大规模并网后引起的双向潮流进行有效管理,发挥分布式电源对配网运行的支撑作用,并确保绿色可再生能源的高效利用<sup>[7,8]</sup>。

目前主动配电网的控制模式主要倾向于集中式控制和分布式控制两种模式<sup>[9,10]</sup>。集中式控制策略的求解复杂程度随着电网规模的增大而增大,尤其是分布式电源接入数量的增大呈现非线性增长的趋势。而分布式控制模式专注于局部区域目标的实现,难以完成全局最优运行,对可控资源的利用也不够充分。针对上述问题,本文提出全局优化与局部自治相协调的主动配电网分层分布控制架构<sup>[11,12]</sup>,采用分层控制结构实现主站系统、控制器和终端设备之间的信息交互,通过多时间尺度下的全局能量管理与区域自治控制实现源-网-荷的协同控制,其框架结构如图1所示。

图1中,位于最上层的主动配电网能量管理系统是整个主动配电网控制架构的中枢,配电网数据

收稿日期:2017-01-31;修回日期:2017-02-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012AA050212)

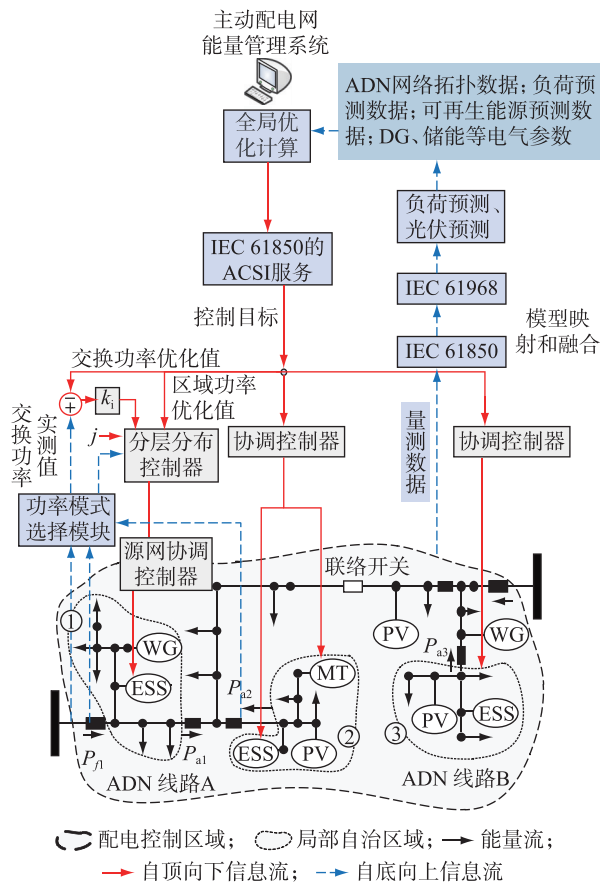


图1 主动配电网分层分布控制架构

Fig.1 Hierarchical control framework of active distribution network

采集与监控(DSCADA)系统采集网络运行数据以及各分布式电源的发电状态信息,在对负荷需求以及间歇式能源发电功率进行预测的基础上,通过智能优化算法计算出长时间尺度下各个可控单元的全局优化控制策略,与此同时求解得出各自治区域的局部目标值(包括馈线出口目标 $P_{n1}$ 和各分段区域目标值 $P_{a1}, P_{a2}, P_{a3}$ )。分层分布控制器是中间层的控制单元,作为一个自治区域的管理者,通过区域自治控制策略实现在长时间尺度优化控制的间隔周期内各个分布式电源的实时协调控制,以修正实际运行工况与理想优化工况的偏差,使主动配电网整体运行在全局优化与区域自治相协调的状态下。源网协调控制器是最底层的控制单元,管理同一配电节点(配电房/开闭所/环网柜等)下所有的可控分布式电源以及柔性负荷,它接收分层分布控制器的功率控制目标,并对其进行合理分配,以确保同一配电节点下的分布式电源得到最经济利用。

分层分布控制技术结合了集中式控制和分布式控制模式的优势,通过多时间尺度的协同控制实现系统一次侧的多级消纳,不仅缓解了控制系统的信息阻塞,而且解决了局部自治目标与全局最优目

标的矛盾,使得整个系统运行在一个较优的状态,并确保绿色可再生能源的优先利用。分层分布控制技术在长时间尺度的全局优化控制实现了网络运行的经济性,而短时间尺度的区域自治控制则提升系统运行的鲁棒性。此外,当主站能量管理系统出现故障或者需要维护时,分层分布控制器仍然能够对区域进行管理,提高了控制系统的可靠性。

## 2 主动配电网优化控制方法

### 2.1 全局能量优化方法

主动配电网全局优化控制策略用于长时间尺度的调度控制,计算周期较长(15 min),能够采用较为复杂的智能优化算法求解主动配电网全局能量优化控制目标。本文主要采取双层规划(bilevel programming problem, BLPP)的方法实现主动配电网全局能量优化控制,上层采取基于粒子群算法的有功优化<sup>[13]</sup>,下层采取基于摄动法的无功优化<sup>[14]</sup>,上下迭代,直至获取最优解。

主动配电网双层规划模型,以有功全局优化作为上层决策,这是主动配电网追求的经济、环境效益的综合体现,是实现区域自治控制的基础;而无功电压优化作为下层决策,是在上层最优决策下对电网电压质量的要求,而电压优化的计算结果又影响上层决策的过程,上下层相互迭代,从而求出有功和无功的综合最优解。

将有功协调优化与电压协调带入双层优化模型,采用上下层决策相互迭代的方式进行求解,上层优化结果代入下层计算,下层优化后再将结果返回上层再次优化,直至两层优化结果收敛。电力系统中有功与无功本身具有耦合关系,无法孤立地考虑,双层优化迭代收敛的结果是有功与无功相配合的最优点,其结果使得主动配电网达到经济收益与电压特性的最优结合。双层优化具体模型结构如图2所示。

图2中所示的优化结构是上下层迭代求解的过程,上层优化决策基于预测信息确定主动配电网分布式电源的有功出力计划曲线,下层根据上层有功出力曲线以及预测信息确定主动配电网分布式电源的无功出力计划曲线以及其他无功调节设备投切策略,反复迭代,直至上下层结果收敛或达到最大迭代次数。

### 2.2 局部自治优化方法

#### 2.2.1 有功自治控制

全局优化考虑主动配电网中具有统计规律的长时间尺度预测信息,一个优化调度间隔(一般15

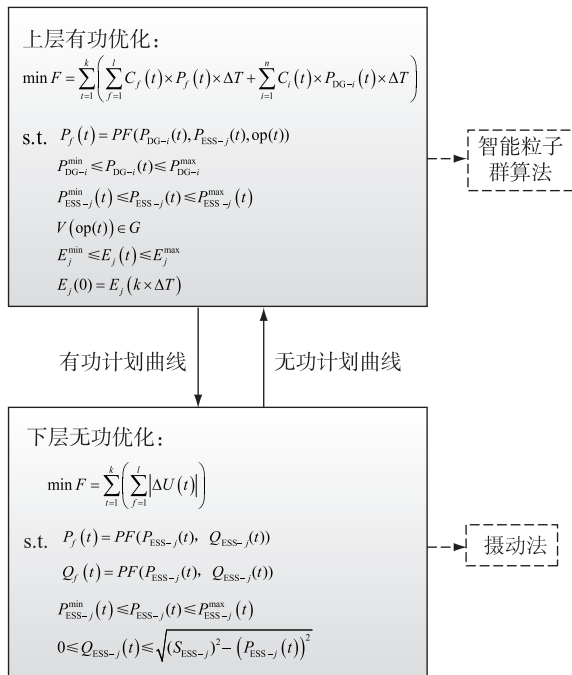


图2 双层优化模型

Fig.2 Bi-level programming model for optimization

min) 或出现消纳能力不足时才进行一次计算,但由于主动配电网中间歇式能源与负荷实时波动,需要下层区域实时自治协调控制相配合,通过多个分布式电源/储能的实时协调,修正实际运行状态与全局优化状态的偏差,使得系统运行状态更加趋向于全局优化目标。

由于外电网与主动配电网的交换功率起到维持功率平衡的作用,可从整体上衡量实际运行状态。基于该交换功率及全局优化中分布式发电、储能的优化控制策略,提出馈线控制误差(feeder control error, FCE) 指标<sup>[15]</sup>,从整体上定量描述主动配电网实际运行状态与全局优化运行状态之间的偏差。基于 FCE,提出考虑不同因素的有功功率实时协调控制模式<sup>[16,17]</sup>,及相应的控制方程与 FCE 计算模型。FCE 协调控制架构如图 3 所示。

基于 FCE 的自治区域协同控制模式不仅能有效甄别自治区域内和区域外的功率扰动,还能对这两种功率扰动有针对性地实现不同的控制响应,其从本质上来讲是将区域内部的可控分布式单元进行集约化一体化协调,主动配电网在短时间尺度遭遇外界扰动致使实际运行状态偏离全局优化状态的情况下,能协同调整区域内部可控分布式单元的功率输出,将功率扰动在平衡机组和各自治区域之间合理分配,以修正实际运行状态与理想优化运行状态的偏差,最终使得系统运行更加趋于全局优化目标,从而提升系统优化运行的鲁棒性。

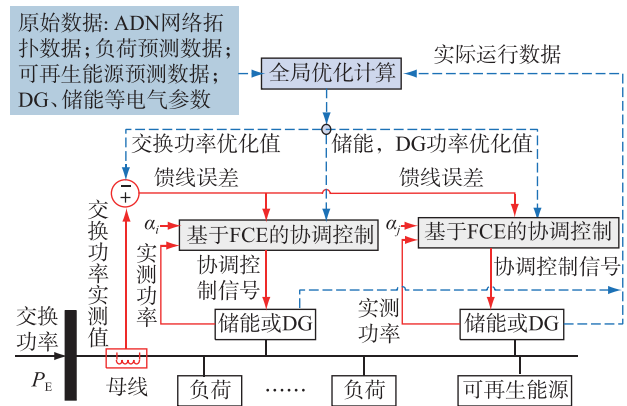


图3 FCE 协调控制

Fig.3 Coordination control based on feeder control error

### 2.2.2 无功自治控制

主动配电网的无功电压全局优化是在主动配电网最优潮流的基础上进一步优化整体区域的无功潮流,提高网络的电压质量,但作为主要无功源的电容器组动作时间过长,仅以全局优化集中控制作为主动配电网的电压调节手段还不足以应付间歇式能源功率频繁波动或者负荷快速扰动引起的电压越限问题<sup>[18]</sup>。

主动配电网无功电压的局部实时协调控制是以馈线为单位,每条馈线需安装一个无功电压协调控制器以确保馈线的实时电压质量。由于馈线无功电压协调控制器是用于对馈线上整体电压水平的实时协调控制,因此其控制对象必需是响应速度快、动作时间短的无功及电压调节设备,包括馈线上的静态电压调节器(static voltage regulator, SVR)、分布式电源以及动态无功补偿设备。为了达到更加有效的控制效果,假设每条馈线都在出口处安装 SVR,这样既可以调节馈线所有节点的电压水平,又能确保每条馈线的电压调节不影响其他馈线,使得以馈线为单位的主动配电网无功电压实时协调控制更为独立。

对馈线实施无功及电压实时协调控制的前提条件就是要对馈线的电压水平进行准确估计,根据馈线的电压水平得出无功源设备或者 SVR 的控制策略。馈线电压水平估计本质上就是估计馈线的最大电压值和最小电压值。由于馈线上不可能每个节点都安装电压测量单元,因此无法实时监测馈线的最大电压值和最小电压值。但是馈线上安装在分段开关的馈线自动化终端(feeder terminal unit, FTU)以及分布式能源(包括动态无功补偿设备)接入点采集到的电压及功率数据已足够用来估计馈线的最大电压值和最小电压值。

通过上述馈线电压最大值及电压最小值<sup>[16]</sup>的

估算,可以计算出馈线电压的最大越限值  $\Delta U_f$ :

$$\Delta U_f = \max(0, U_f^{\max} - U_{\max}) + \min(0, U_f^{\min} - U_{\min}) \quad (1)$$

根据  $\Delta U_f$  值可以求解出各个分布式电源(包括动态无功补偿设备)无功功率的修正量以及 SVR 分接头档位的调节量。主动配电网馈线无功电压自治协调控制如图 4 所示。

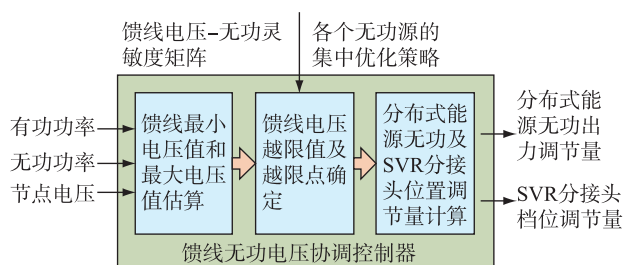


图 4 馈线电压控制

Fig.4 Voltage regulation of feeder

图 4 中馈线无功电压协调控制器所需的状态信息由 FTU 实时采集获取,馈线上的电压-无功灵敏度矩阵信息及各个分布式能源初始无功输出量由主动配电网能量管理系统中的无功电压全局优化控制计算得出,其更新周期与全局优化一致。

### 3 仿真验证与分析

仿真算例如图 5 所示。共配置 11 个光伏、8 个储能、1 个风机、2 个微型燃气轮机、28 个负荷点,其中包括 4 个工业负荷(T8、T12、T13、T21)和 24 个居

民负荷、37 个可控开关。PV12(1)、PV12(2)、PV13、PV21 光伏额定容量为 1 MW, PV8 光伏额定容量为 0.5 MW,其余光伏额定容量为 0.25 MW。ESS19 为复合储能,其中包括 2 个 50 kW·h、5 C 放电的功率型储能,1 个 500 kW·h、0.2 C 放电的能量型储能,其余储能均为 250 kW·h、1 C 放电。

以 24 h 连续运行场景进行仿真验证。对区域 5 进行分析,其中,ESS11 为功率密度型储能系统,其最大充放电功率为 80 kW,其能量容量较小,为 30 kW·h。负荷、风机及光伏系统在 24 h 内每分钟的预测功率及实际功率如图 6 所示。

与预测功率相比,实际负荷功率具有波动性,而风机、光伏系统实际功率则由于受天气变化而功率偏差较大。如光伏系统,在 12:00 至 18:00,由于天气的变化其输出功率与预测值有明显偏差。

根据负荷预测、光伏与风机功率预测,主站制定区域中并网的储能系统、分布式电源的优化运行计划。其中,ESS11 为高功率密度、低能量密度型储能系统,用于平抑光伏、风机的功率短时间波动;ESS27、DG15 与 DG28 的运行计划如图 7 所示。

依据优化运行方式,可实现峰谷差减小(由原始 4334 kW 降低至 4201 kW),网络损耗降低 3.7%,共计 19 个时段获得优化,如图 8 所示。

但由于负荷、风机与光伏功率的预测值与实际值存在偏差,若严格按照运行计划控制分布式电源与储能系统功率,那么区域总功率(与外电网的交

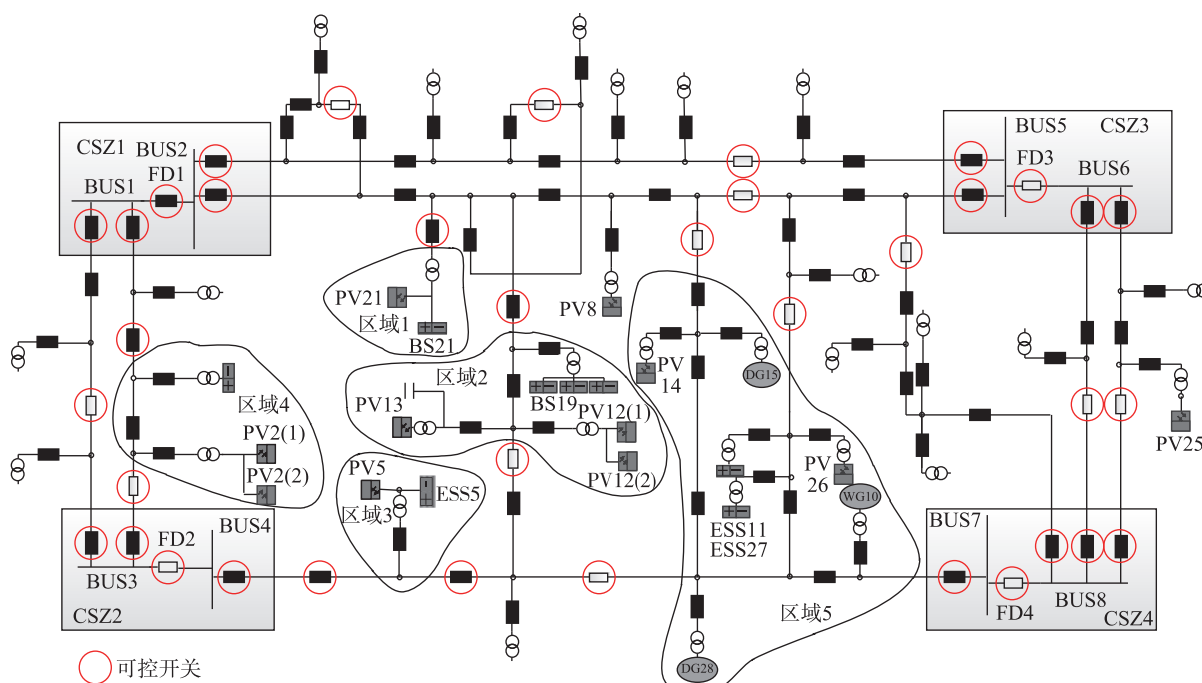


图 5 仿真测试算例

Fig.5 Study case

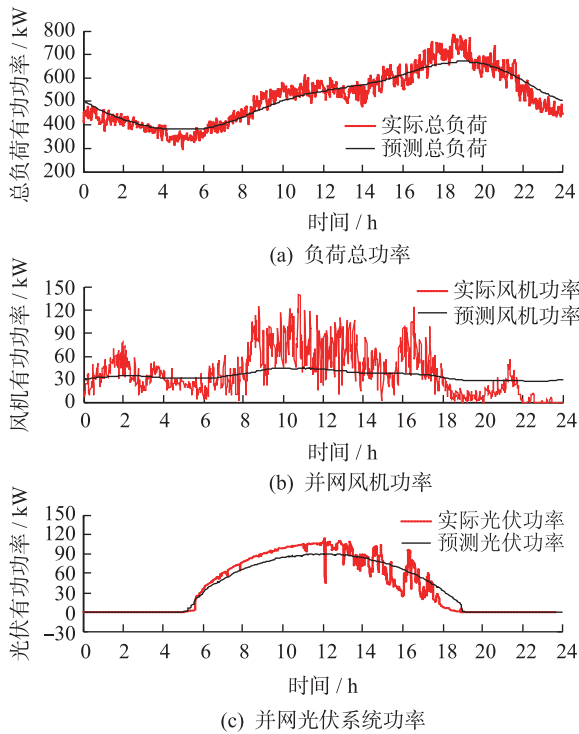


图6 负荷、风机及光伏出力  
Fig.6 Output of load, wind turbine & PV

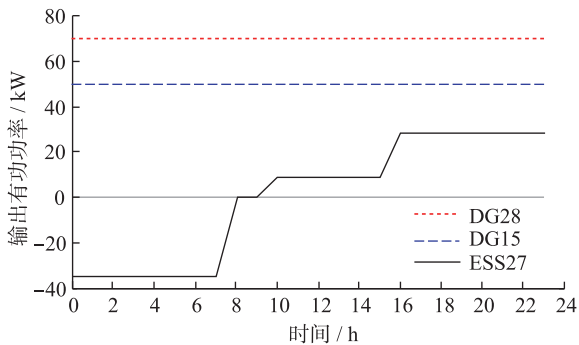


图7 DG15, DG28 与 ESS27 的运行计划  
Fig.7 Operation schedule of DG15, DG28 & ESS27

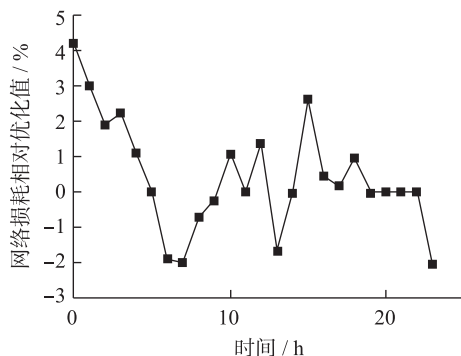


图8 优化运行效益  
Fig.8 Effect of optimal schedule

换功率)的计划值与实际值亦存在偏差。且由于风机、光伏的功率波动,使交换功率亦具有波动性,并影响各节点电压。

基于 FCE 的协调控制系统,其中 ESS27 与 DG28 采用偏差交换功率控制模式, DG15 采用考虑 DG 发电量误差的控制模式,以平衡交换功率误差中的稳定分量。DG15 在 24 h 内的合约发电量为  $1200 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。ESS11 采用考虑 SOC 误差的控制模式,以抑制光伏、风机及负荷短时间内的波动,其计划功率为 0,计划 SOC 为 0.5。

在基于 FCE 的协调控制系统下,区域总功率的实际值与计划值如图 9(a) 所示。从与图 9(b) 的比较可以看出,若无协调控制系统,区域总功率实际值与计划值差异较大,并且短时间波动量较多。在基于 FCE 的协调控制下,分别对区域总功率偏差的波动分量及稳定分量进行补偿,使得协调控制下的总功率的实际值更接近其计划值。

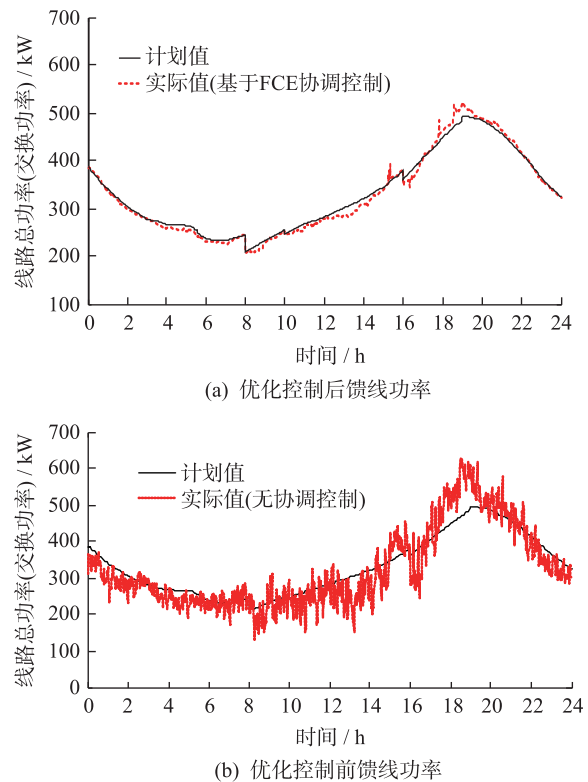


图9 优化控制前后的馈线功率  
Fig.9 Feeder output power with & without optimal coordinate control

## 4 结论

本文主要围绕主动配电网源-网-荷协调控制技术开展研究,建立了多时间尺度的主动配电网源-网-荷分层协调控制架构,提出了基于双层优化算法的主动配电网全局优化调度和馈线自治控制方法,实现了主动配电网各分布式电源(含储能)的功率优化调度和间歇式可再生能源的足额消纳,重点解决了大规模间歇式能源无序并网后的配网优

化运行问题。仿真算例的结果有效验证了上述主动配电网源-网-荷协调优化控制技术的可行性和有效性,为日后含分布式能源的配网运行调度提供技术参考和有益借鉴。但本文重点研究的主动配电网协调优化控制技术主要是针对正常态下的源-网-荷功率控制和电压调节,后续需要进一步开展故障态下的主动配电网自愈控制技术研究,从而为主动配电网的安全经济运行提供整体解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.  
LIU Zhenya. Smart grid technology[M]. Beijing:China Electric Press,2010.
- [2] 王成山,李 鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power System,2010,34(2):10-14.
- [3] 谢 开,刘永奇,朱治中. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力,2008,41(6):19-22.  
XIE Kai, LIU Yongqi, ZHU Zhizhong. The vision of future smart grid[J]. Electric Power,2008,41(6):19-22.
- [4] 韦 钢,吴伟力,胡丹云. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术,2007,41(1):36-40.  
WEI Gang, WU Weili, HU Danyun. Distributed Generation and Effects of its Parallel Operation on Power System[J]. High Voltage Engineering,2007,41(1):36-40.
- [5] SAMUELSSON O, REPO S, JESSLER R, et al. Active distribution network-demonstration project ADINE [C] // Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe. Gothenburg, Sweden; IEEE,2010:1-8.
- [6] MAH D N, WU YY, IP J C, et al. The role of the state in sustainable energy transitions: A case study of large smart grid demonstration projects in Japan[J]. Energy Policy,2013(63):726-737.
- [7] 范明天,张祖平,苏傲雪. 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. Enabling technologies for active distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(22):12-18.
- [8] 尤 毅,刘 东,于文鹏. 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. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power System,2012,36(18):10-16.
- [9] MADUREIRA A, GOUVEIA C, MOREIRA C, et al. Coordinated management of distributed energy resources in electrical distribution systems[C] // Innovative Smart Grid Technologies Latin America. Sao Paulo. Brazil; IEEE,2013:1-8.
- [10] ZHAO J, WANG C, 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):280-293.
- [11] 刘 东,陈云辉,黄玉辉. 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. Hierarchical energy management and coordination control of active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 ( 31 ): 5500-5506.
- [12] CALDERARO V, CONIO G, GALDI V. Active management of renewable energy sources for maximizing power production [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2014(57):64-72.
- [13] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(1):121-131.
- [14] DOLAN M J, DAVIDSON E M, KOCKAR I. Distribution power flow management utilizing an online optimal power flow technique [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (2):790-799.
- [15] 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.
- [16] YU Wenpeng, LIU Dong, HUANG Yuhui. Load transfer and islanding analysis of active distribution network [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, (25):1420-1435.
- [17] 尤 毅,刘 东,钟 清. 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. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power System,2012,36(18):10-16.
- [18] YOU Yi, CHENG Jiongcong, YU Nanhua, et al. Coordinate Voltage Control in Active Distribution Network [C] // 2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China; IEEE, 2014:2668-2673.

#### 作者简介:



李海涛

李海涛(1982—),男,吉林白山人,博士,高级工程师,从事智能配电网、主动配电网研究工作(E-mail:478072603@qq.com)。

## Research and Application of Coordinate control & Optimization Technology for Active Distribution System

LI Haitao

(Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** The clean energy sources are utilized extensively due to environment protection. There will be series of challenges for distribution system operation and control with the high penetration of distributed generation (DG) in near future. This paper highlights the control framework and optimization approach for the coordination of source-net-load in active distribution system, which can realize the effective accommodation distributed renewable resources and secure and economic operation. It can solve the compatibility between distribution systems with distributed generation. Simulation results validate the effectiveness of the coordinated control technology for active distribution system.

**Key words:** clean energy sources; distributed generation; active distribution system; coordinated control of source-net-load; optimal control

(编辑 徐林菊)

(上接第 7 页)

作者简介:



刘 东

刘 东(1968—),男,江苏盐城人,博士,教授,主要研究方向为智能电网、主动配电网、电网物理信息系统(E-mail: dongliu@sjtu.edu.cn);

张 弘(1993—),男,山东青岛人,硕士,研究方向为智能配电网、信息集成(E-mail: colinzh@163.com);

王建春(1973—),男,江苏淮安人,工程师,从事电气专业技术和管理工作。

### Review on the State of the Art of Active Distribution Network Technology Research

LIU Dong<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>1</sup>, WANG Jianchun<sup>2</sup>

(1. Electronic Information and Electrical Engineering School of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Huaian Power Supply Company, Huaian 223001, China)

**Abstract:** As an effective solution to large-scale distributed energy interconnection and optimal operation of distribution network, the Active Distribution Network(ADN) becomes the trend of next generation intelligent distribution network, and has aroused extensive and deep research of scholars. This paper analyses the key technologies of ADN research status, including ADN planning technology, ADN operation control technology, ADN power supply restoration technology and ADN load management technology. This paper also introduces the ADN demonstration projects.

**Key words:** active distribution network; renewable Energy; demonstration project; review

(编辑 刘晓燕)