

主动配电网分布式有功无功优化调控方法

寇凌峰¹, 吴鸣¹, 李洋³, 屈小云¹, 谢辉², 高博², 陈凡², 胡存刚³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市海淀区 100192; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽省 合肥市 230601; 3. 安徽大学, 安徽省 合肥市 230601)

Optimization and Control Method of Distributed Active and Reactive Power in Active Distribution Network

KOU Lingfeng¹, WU Ming¹, LI Yang³, QU Xiaoyun¹, XIE Hui², GAO Bo², CHEN Fan², HU Cungang³

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230601, Anhui Province, China; 3. Anhui University, Hefei 230601, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The access of large-scale distributed generations resulting great challenges to the structure, operation procedures, control methods and protection configuration of traditional distribution network. In order to solve the problem of centralized management and optimal control of large-scale distributed generations, energy storage systems and multitype loads in distribution network, a distributed active and reactive power optimization control method for active distribution network was proposed in this paper. Firstly, the active distribution network was divided into several regions. The goal of maximizing the distributed generation consumption, minimizing the grid voltage deviation and the network loss in different regions was set up. The sub-optimization model of each region was established. Then, according to the boundary information exchanged between adjacent regions, the sub-models of each region were solved by accelerated alternating direction method of multipliers (A2DM2). After iterative calculation, the approximate global optimal solution is obtained, which realizes the decoupling of active distribution network and the distributed control of each region. The proposed method can not only ensure the operation economy of active distribution network, but also improve the voltage quality of power grid and the self-consumption level of distributed power supply. Meanwhile, the impact of power reversal on the upper-level power grid are reduced. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are verified by simulations.

KEY WORDS: distributed generation; active and reactive

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900400); 国家电网公司科技项目(提高光伏扶贫地区电网消纳能力与保障技术研究与应用)。

National Key R&D Program of China (2016yfb0900400); Science and Technology Project of State Grid Corporation (Research And Application of Improving Grid Absorption Capacity And Supporting Technology in Photovoltaic Poverty Alleviation Area).

power coordinated optimal dispatch; accelerated alternating direction method of multipliers (A2DM2); global optimum

摘要: 大规模分布式电源接入对传统配电网的拓扑结构、运行规程、控制方式和保护配置等都提出了极大的挑战。为解决配电网中大规模多类型分布式电源、储能系统和多类型负荷的集中管控与优化控制问题, 该文提出一种主动配电网的分布式有功无功优化调控方法。首先, 对主动配电网进行合理分区, 并以配电网不同分区内分布式电源消纳最大化、电网电压偏差最小及网损最小为目标, 并建立各个分区的子优化模型。之后, 根据相邻区域之间交换的边界信息, 采用加速交替方向乘子法协调求解各个区域的子模型, 经过迭代计算后, 得到近似全局最优解, 实现主动配电网区间解耦和各分区分布式控制。所提控制方法在确保主动配电网运行经济性的同时提高了电网的电压质量和对分布式电源的自消纳水平, 减少功率倒送对上级电网的影响。最后, 仿真验证所提控制方法的有效性和可行性。

关键词: 分布式电源; 有功无功协调调度; 加速交替方向乘子法; 全局最优;

0 引言

随着风力发电和光伏发电等大量分布式电源接入配电网, 传统配电网正从单向供电配电网向能量双向流动的有源主动配电网转变^[1-2]。与传统配电网控制相比, 主动配电网需要在保证系统安全稳定运行的前提下, 通过对系统内多类型分布式电源、设备的调控, 提高系统内分布式能源的自消纳能力, 减少对主电网的影响^[3-4]。对于主动配电网的主动控制可以分为全局优化和实时控制两方面。

文献[5]提出一种通过调控分布式能源和联络线开关实现完整调度周期内系统运行成本最低的优化目标模型, 求解方法为智能单粒子优化算法;

文献[6]在考虑需求响应的基础上,将混合整数二阶锥优化应用于主动配电网电压、网损和需求响应利用率最大的多目标控制,但是其优化变量不仅包括离散变量还有连续变量,为求解带来一定的困难。文献[7]在考虑需求响应和配电网安全约束的基础上,将混合整数二阶锥优化应用于电动汽车日常充电和并联电容器开关切换的优化调度,减少总有功功率损耗。

全局优化的控制方式一般为集中式控制,根据对全网数据的采集和监测,配电网管理系统下发各受控单元的控制指令,但是随着配电网规模的扩大,管理系统将要面对海量数据的收集和处理,增加了系统的通信负担,一旦出现通信故障,管理系统便会崩溃。此外,集中式控制涉及所有者的隐私,存在安全隐患,容易遭受网络 and 物理攻击。而分布式控制只需要通过本地信息的收集和邻居之间的弱通信就能够实现集中式的控制效果,同时,相比于全局优化更有实时性,能够很好的应对可再生能源的随机性和负荷出力的不确定性。

在分区分布式模型优化方面,文献[8]在主动配电网区域划分的基础上,设计了一种包含 3 种控制模式的分层分布区域控制模型,能够满足电网的不同需求;文献[9]对传统模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)聚类算法进行了改进,提出一种基于初始聚类中心选取的 FCM 聚类算法,避免算法易陷入局部最优的缺点,与传统 FCM 聚类算法相比能够加快聚类分群的速度;文献[10]在主动配电网合理分区的前提下,利用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)设计出一种二阶锥规划的求解器,实现了系统的分布式无功优化。文献[11]首先将非凸问题转化为可分布式求解的二次规划问题,然后利用同步型 ADMM 求解物理分区后的配电网无功优化计算。

目前,在配电网分布式优化方面国内外相关研究主要集中于无功优化层面,但是含大规模分布式电源的主动配电网有功无功耦合性较强^[12],有必要从有功无功协调优化的层面对其进行控制。基于上述考虑,本文从配电网分区分布式控制和有功无功协调调度两方面出发,提出一种分区分布式主动调控策略。首先对主动配电网合理分区,每个区域配备一个控制器,以有功损耗和电压偏差最小为多目标函数,分布式加速交替方向乘子法(accelerated alternating direction method of multipliers, A2DM2)

算法为求解手段,通过本地信息的采集和邻居耦合支路信息的交换,分布式求解本地区域的子问题,经过迭代计算后得到近似全局最优解。

1 主动配电网模型

1.1 优化目标

通过对多类型分布式电源、储能及可控负荷实施主控管理控制,达到提升分布式能源消纳水平,降低系统与提高供电电压合格率的目标。

$$\begin{cases} \min F_a^1 = \sum_{t=1}^T |P_{PCC}(t)| \\ \min F_a^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i - U_i^{spec}}{U_i^{max} - U_i^{min}} \right)^2 \\ \min F_a^3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in v(i)} r_{ij} i_{ij,t} \end{cases} \quad (1)$$

采用加权的方式将多目标的短期滚动优化模型归一化为单目标优化问题:归一化的目标函数表达式可表示为

$$\min F = \lambda_{Sy-1} \cdot \frac{F_a^1}{F_1^0} + \lambda_{Sy-2} \cdot \frac{F_a^2}{F_2^0} + \lambda_{Sy-3} \cdot \frac{F_a^3}{F_3^0} \quad (2)$$

式中: F_1^0 、 F_2^0 、 F_3^0 分别为优化前 3 个目标函数的初始值; λ_{Sy-1} 、 λ_{Sy-2} 、 λ_{Sy-3} 分别为 3 个目标函数的权重, $\lambda_{Sy-1} + \lambda_{Sy-2} + \lambda_{Sy-3} = 1$, 其中 $\lambda_{Sy-1}, \lambda_{Sy-2}, \lambda_{Sy-3} \geq 0$ 。

1.2 约束条件

1) 潮流约束。

含分布式电源的辐射型主动配电网模型如图 1 示。定义含 n 节点的主动配电网为有向图 $G = \{V, E, R\}$, 节点集合 $V = \{1, 2, \dots, n\}$, 其中 1 代表 PCC 点。支路用边集 $E = \{(i, j)\} \subset V \times V$ 表示。含有可控设备的节点集合被定义 R 。

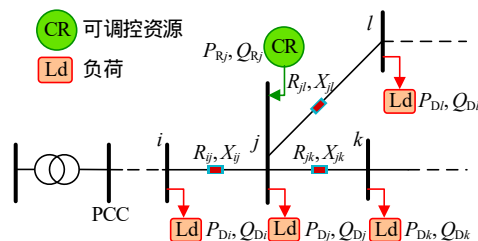


图 1 DistFlow 支路潮流等式

Fig. 1 Branch flow model of DistFlow

等式潮流约束方程中由于复杂二次项的存在导致优化问题非凸,分布式优化算法在应用于一般非凸性问题难以保证收敛性。因此,本文采用二阶锥规划^[9]对原问题凸优化,采用 DistFlow 作为潮流计算方法,如式(4)所示。

引入辅助变量 v_{ij} , i_{ij} , 对其定义分别为:

$$\begin{cases} v_{ij} = (V_{ij})^2 \\ i_{ij} = (I_{ij})^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{ij} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} + P_j + i_{ij} r_{ij} \\ Q_{ij} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} + Q_j + i_{ij} x_{ij} \\ v_j = v_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + [(r_{ij})^2 + (x_{ij})^2] i_{ij} \\ V_1 = V_{\text{ref}} \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} P_j = \begin{cases} P_{D,j} - P_{R,j}, & \forall j \in R \\ P_{D,j}, & \forall j \in V - R \end{cases} \\ Q_j = \begin{cases} Q_{D,j} - Q_{R,j}, & \forall j \in R \\ Q_{D,j}, & \forall j \in V - R \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路 ij 流过的有功功率和无功功率; P_j 、 Q_j 分别为节点 j 注入的有功功率和无功功率; V_i 、 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; V_1 、 V_{ref} 分别为 PCC 点的电压幅值和参考电压值; I_{ij} 为支路 ij 流过的电路幅值; r_{ij} 、 x_{ij} 为支路 ij 的阻抗值; $k:j \rightarrow k$ 为以 j 为上级节点的所有末端节点集合。

$$i_{ij} = \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{v_i}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (6)$$

式(6)可被转化为标准二阶锥松弛形式:

$$\begin{cases} \left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \end{bmatrix} \right\| \leq i_{ij} + v_i \\ i_{ij} - v_i \end{cases} \quad (7)$$

2) 安全运行约束。

主动配电网有功无功协调优化过程中还需要满足节点电压在安全范围内和支路电流约束, 如下所示:

$$\begin{cases} v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \\ i_{ij} \leq i_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_i^{\min} 、 v_i^{\max} 分别为节点 i 电压幅值最小值的平方和最大值的平方; i_{ij}^{\max} 为流过支路 ij 电路幅值最大值的平方。

3) 可调资源有功无功出力。

有功无功协调调度模型中主要的调度资源为光伏、微型燃气轮机、储能。由于光伏系统归属不同的运营商, 为了经济效益考虑, 规定光伏以最大功率发电, 只可调控其无功功率, 而储能的有功无

功皆可调控。

光伏有功无功出力约束。

$$\begin{cases} P_{\text{PV},j} = P_{\text{PV},j}^{\text{MPPT}} \\ (Q_{\text{PV},j})^2 + (P_{\text{PV},j})^2 \leq S_{\text{PV},j}^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{PV},j}$ 、 $Q_{\text{PV},j}$ 为节点 j 注入的光伏有功和无功功率; $P_{\text{PV},j}^{\text{MPPT}}$ 为节点 j 的光伏工作在 MPPT 点注入该节点的有功功率; $S_{\text{PV},j}$ 为节点 j 的光伏装机容量。

微型燃气轮机约束。

$$\begin{cases} P_{\text{MT},j}^{\min} \leq P_{\text{MT},j}^{t+1} \leq P_{\text{MT},j}^{\max} \\ (P_{\text{MT},j}^{t+1})^2 + (Q_{\text{MT},j}^{t+1})^2 \leq (S_{\text{MT},j})^2 \\ P_{\text{MT},j}^{t+1} - P_{\text{MT},j}^t \leq \delta_{\text{MT},j}^{\text{Up}} \\ P_{\text{MT},j}^t - P_{\text{MT},j}^{t+1} \leq \delta_{\text{MT},j}^{\text{Down}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{MT},j}^{t+1}$ 、 $Q_{\text{MT},j}^{t+1}$ 为微型燃气轮机在时刻 t 通过逆变器注入节点 j 处的有功功率和无功功率; $P_{\text{MT},j}^{\max}$ 、 $P_{\text{MT},j}^{\min}$ 分别为时刻 t 微型燃气轮机通过逆变器注入节点 j 处的有功功率上下限值; $S_{\text{MT},j}$ 为燃气轮机的逆变器装机容量; $\delta_{\text{MT},j}^{\text{Up}}$ 、 $\delta_{\text{MT},j}^{\text{Down}}$ 分别为微型燃气轮机爬坡速率上下限值。

储能有功无功出力约束。

$$\begin{cases} -P_{\text{ESS},j}^{\max} \leq P_{\text{ESS},j} \leq P_{\text{ESS},j}^{\max} \\ (P_{\text{ESS},j})^2 + (Q_{\text{ESS},j})^2 \leq (S_{\text{ESS},j}^{\max})^2 \\ E_{\text{ESS},j}^{t+1} = \begin{cases} E_{\text{ESS},j}^t + P_{\text{ESS},j} \eta_{\text{Ch},j} \Delta t, & P_{\text{ESS},j} \geq 0 \\ E_{\text{ESS},j}^t - \frac{P_{\text{ESS},j} \Delta t}{\eta_{\text{Dis},j}}, & P_{\text{ESS},j} < 0 \end{cases} \\ E_{\text{ESS},j}^{\max} \times 20\% \leq E_{\text{ESS},j}^t \leq E_{\text{ESS},j}^{\max} \times 80\% \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{ESS},j}$ 、 $Q_{\text{ESS},j}$ 分别为节点 j 处储能系统注入的有功功率和无功功率; $P_{\text{ESS},j}$ 为正表示储能处于充电状态, 否则处于放电状态; $S_{\text{ESS},j}$ 为节点 j 处储能逆变器的最大视在功率; $E_{\text{ESS},j}^t$ 为节点 j 处储能系统在时刻 t 存储的电量; $E_{\text{ESS},j}^{\max}$ 为节点 j 处储能系统存储电量的上限值; $\eta_{\text{Ch},j}$ 、 $\eta_{\text{Dis},j}$ 分别为储能系统充放电效率。

2 分布式区间协调控制

假定配电网被划分为 N 个区域。 V_a 、 E_a 、 R_a 分别表示区域 a 内节点集合, 边集合以及可控资源集合。对于任意一个区域 a , 其与相邻区域之间通过某一联络线耦合连接。根据分解协调原理^[13], 需要将区间耦合支路解耦, 将区域 a 与相邻区域的耦合支路复制到区域 a 组成新的区域, 新区域 a 节

点集合用 \bar{V}_a 表示。以图 2 所示配电系统为例，区域 1 的节点集合 $V_1 = \{1, 2, 3, 4, 12, 13\}$ 和 $\bar{V}_1 = \{1, 2, \dots, 5, 12, 13\}$ ，区域 2 的节点集合 $V_2 = \{5, 6, 7\}$ 和 $\bar{V}_2 = \{4, 5, \dots, 8\}$ ，区域 3 的节点集合 $V_3 = \{8, 9, 10, 11, 14, 15\}$ 和 $\bar{V}_3 = \{7, 8, \dots, 11, 14, 15\}$ 。

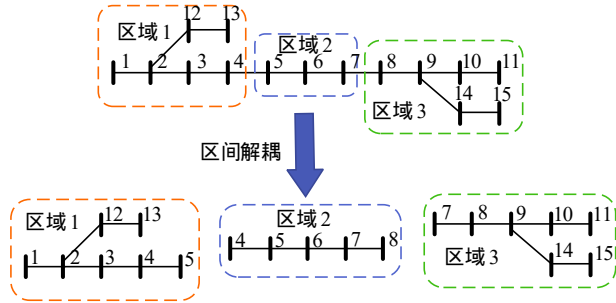


图 2 区间解耦示意图

Fig. 2 Interval decoupling schematic diagram

定义 $S_{a,i} = \{P_{a,i}, Q_{a,i}, P_{a,ij}, Q_{a,ij}, v_{a,i}, i_{a,ij} \mid \forall j: i \rightarrow j\}$ 为区域 a 节点 i 子问题的最优解，区域 a 中耦合支路的状态变量定义为 $B_{a,ij} = \{P_{ij}, Q_{ij}, v_i, v_j, i_{ij} \mid \forall j: i \rightarrow j\}$ 。为了使分区求解后的问题达到原问题集中式求解相同的效果，相邻区域耦合支路状态变量必须相等。因此原问题(2)可以被等价转化为

$$\begin{cases} \min \sum_{a=1}^N f_a(S_a) \\ \text{s.t.} & g_a(S_a) \geq 0 \\ & h_a(S_a) = 0 \\ & S_a^{\min} \leq S_a \leq S_a^{\max} \\ & B_{a,ij} = B_{b,ij} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $F_a(S_a)$ 为原问题分解到区域 a 中的子问题的目标函数； $h_a(S_a)$ 为区域 a 中子问题的不等式约束； S_a^{\max} 、 S_a^{\min} 为子问题中的上下限约束。

3 A2DM2 分布式求解

利用分解协调原理，原问题被分解成含有边界耦合约束的可被多个子区域并行求解的子问题。此问题可采用标准的 ADMM 算法进行分散求解计算，其计算步骤^[14]为

$$\begin{cases} S_a^{t+1} = \arg \min [F_a(S_a) + \lambda^t (B_{a,ij} - B_{b,ij}^t) + \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij} - B_{b,ij}^t\|] \\ S_b^{t+1} = \arg \min [F_b(S_b) + \lambda^t (B_{a,ij}^{t+1} - B_{b,ij}) + \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij}^{t+1} - B_{b,ij}\|] \\ \lambda^{t+1} = \lambda^t + \rho (B_{a,ij}^{t+1} - B_{b,ij}^{t+1}) \end{cases} \quad (13)$$

式中： t 为迭代次数； λ 为增广拉格朗日乘子向量；

ρ 为惩罚参数。标准 ADMM 算法在求解过程中，2 个区域之间的求解顺序是固定的，上一个区域的求解结果代入后一个区域进行求解计算，然后再利用 2 个区域的求解结果通过全局协调器对增广拉格朗日乘子 λ 更新与广播。其求解过程是串行方式，这个迭代方式需要中间协调器且计算速度有限(收敛速度为 $O(1/t)$)，不利于分布式优化求解的应用。针对此问题，本文将 A2DM2 算法应用于并行求解分区分布式优化，此算法利用加速梯度方法提高收敛速度，其收敛速度为 $O(1/t^2)$ ，A2DM2 优化算法框架如图 3 所示。以式(13)的第 1 个式子为例，一次项和二次项分别为

$$\begin{aligned} & \lambda^t (B_{a,ij} - B_{b,ij}^t) + \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij} - B_{b,ij}^t\|_2^2 = \\ & \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij} - B_{b,ij}^t\|_2^2 + \frac{1}{\rho} \lambda^t \|B_{a,ij} - B_{b,ij}^t\|_2^2 - \frac{1}{2\rho} \|\lambda^t\|_2^2 \end{aligned} \quad (14)$$

令 $u^t = \lambda^t / \rho$ ，常数 $\|\lambda^t\|_2^2 / (2\rho)$ 可被省略，则式(14)可被转化为

$$\begin{cases} S_a^{t+1} = \arg \min (F_a(S_a) + \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij} - B_{b,ij}^t + u^t\|_2^2) \\ S_b^{t+1} = \arg \min (F_b(S_b) + \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij}^{t+1} - B_{b,ij} + u^t\|_2^2) \\ u^{t+1} = u^t + (B_{a,ij}^{t+1} - B_{b,ij}^{t+1}) \end{cases} \quad (15)$$

为了使 u^t 的更新不需要中心协调器参与，将算法转换为同步计算，选取上一次本区域计算结果与相邻区域上一次迭代的计算结果的平均值作为下一次迭代计算的参考值替换相邻区域的边界变量值，即：

$$B_{Ka,ij}^{t+1} = B_{Kb,ij}^{t+1} = \frac{B_{a,ij}^t + B_{b,ij}^t}{2} \quad (16)$$

式中 $B_{a,ij}^t$ 、 $B_{b,ij}^t$ 分别为第 t 次迭代本区域与相邻区域求解得到的边界装填变量。将其代入式(15)，同时为了提高算法的收敛性，本文利用加速梯度法更新增广拉格朗日乘子向量 λ 和参考值 $B_{Ka,ij}^{t+1}$ 和 $B_{Kb,ij}^{t+1}$ ：

$$\begin{cases} S_a^{t+1} = \arg \min (F_a(S_a) + \frac{\rho}{2} \|B_{a,ij} - \bar{B}_{Ka,ij}^t + \bar{u}^t\|_2^2) \\ B_{Ka,ij}^{t+1} = \frac{B_{a,ij}^{t+1} + B_{b,ij}^{t+1}}{2} \\ u_a^{t+1} = \bar{u}_a^t + (B_{a,ij}^{t+1} - B_{Ka,ij}^{t+1}) \\ \alpha^{t+1} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(\alpha^t)^2}}{2} \\ \bar{u}_a^{t+1} = u_a^{t+1} + \frac{\alpha^t - 1}{\alpha^{t+1}} (u_a^{t+1} - u_a^t) \\ \bar{B}_{Ka,ij}^{t+1} = B_{Kb,ij}^{t+1} + \frac{\alpha^t - 1}{\alpha^{t+1}} (B_{Ka,ij}^{t+1} - B_{Ka,ij}^t) \end{cases} \quad (17)$$

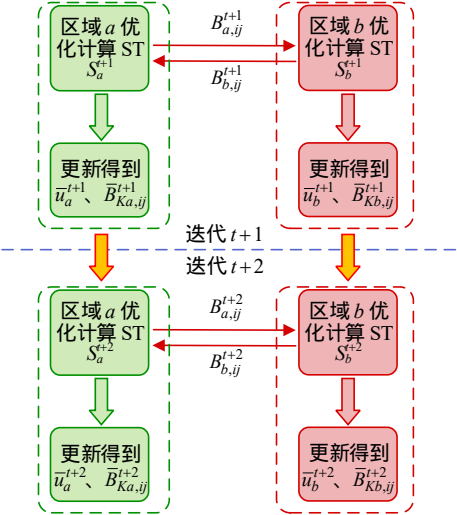


图 3 A2DM2 优化算法框架

Fig. 3 A2DM2 optimization algorithm framework

$$\left\{\begin{aligned} S_b^{t+1} &= \arg \min(F_b(S_b) + \frac{\rho}{2} \|B_{b,ij} - \bar{B}_{Kb,ij}^t + \bar{u}^t\|_2^2) \\ B_{Kb,ij}^{t+1} &= \frac{B_{a,ij}^{t+1} + B_{b,ij}^{t+1}}{2} \\ u_b^{t+1} &= \bar{u}_b^t + (B_{b,ij}^{t+1} - B_{Kb,ij}^{t+1}) \\ \alpha^{t+1} &= \frac{1 + \sqrt{1 + 4(\alpha^t)^2}}{2} \\ \bar{u}_b^{t+1} &= u_b^{t+1} + \frac{\alpha^t - 1}{\alpha^{t+1}}(u_b^{t+1} - u_b^t) \\ \bar{B}_{Kb,ij}^{t+1} &= B_{Kb,ij}^{t+1} + \frac{\alpha^t - 1}{\alpha^{t+1}}(B_{Kb,ij}^{t+1} - B_{Kb,ij}^t) \end{aligned}\right. \quad (18)$$

以区域 a 为例，A2DM2 算法的原始残差和对偶残差为 $r_a^{t+1} = \|u_a^{t+1} - \bar{u}_a^{t+1}\|_2$ 和 $d_a^{t+1} = \|B_{a,ij}^{t+1} - \bar{B}_{a,ij}^{t+1}\|_2$ ，本文以对偶残差趋向于零作为算法收敛判据，收敛精度为 ε ，即当满足下式时认为算法收敛，输出最优解：

$$d_a^{t+1} = \|B_{a,ij}^{t+1} - \bar{B}_{a,ij}^{t+1}\|_2 \leq \varepsilon \quad (19)$$

4 仿真分析

4.1 仿真系统设置

本文以实际配电线路为例建立仿真算例，拓扑结构如图 4 所示，采用文献[15]所提的基于改进模块度的配电网分区方法将测试系统划分为 3 个区域，区域 A 的节点集合为 $\{1, 2, \dots, 9, 17, 24, 25\}$ ，区域 B 的节点集合为 $\{8, 9, \dots, 16, 26, 27, 28\}$ ，区域 C 的节点集合为 $\{18, 19, \dots, 23\}$ ；光伏分别分布于节点 $\{4, 11, 13, 17, 20, 23, 25\}$ ，其装机容量分别为 600、500、1200、800、300、600、500kVA；储能分别分布于节点 $\{5, 14, 21\}$ ；在区域 A 中的节点 7 安装了一个微型燃气轮机。储能和微型燃气轮机具体仿真

参数分别如表 1、2 所示，系统控制参数如表 3 所示。

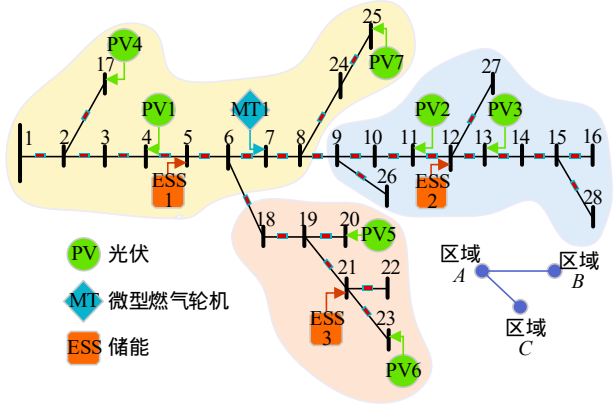


图 4 10kV 线路

Fig. 4 Topology of 10kV line

表 1 储能参数

Tab. 1 Parameters of energy storage system

类型	功率上下限/kW	视在功率/kVA	容量/(kW·h)
ESS1	200/-200	400	1200
ESS2	400/-400	800	2400
ESS3	100/-100	200	600

表 2 微型燃气轮机参数

Tab. 2 Parameters of micro gas turbine

类型	爬坡上下限/kW	功率上下限/kW	视在功率/kVA
MT1	10/10	200/50	400

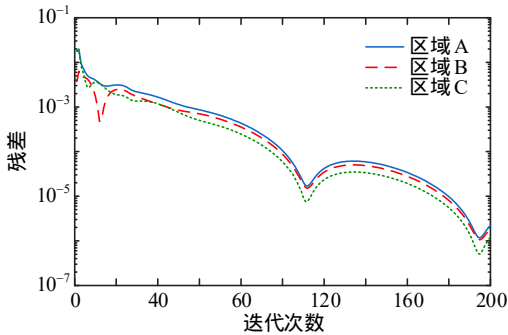
表 3 仿真参数设置

Tab. 3 Setting of simulation parameters

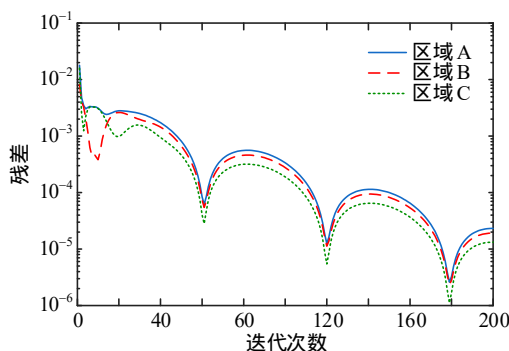
参数	数值	参数	数值
ρ	0.8	γ	0.6
α^0	1	η	0.4
ε	10^{-4}	—	—

4.2 算法比较分析

为了验证本文所提集群分布式调控策略的优越性，将其控制效果与文献[9]的 ADMM 算法的效果进行比较，目标函数与约束条件与本文所述相同。图 5(a)、(b)分别为 ADMM 算法的对偶残差收敛波形和本文所提 A2DM2 算法对偶残差收敛波



(a) ADMM 对偶残差收敛曲线



(b) A2DM2 对偶残差收敛曲线

图5 对偶残差收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of dual residual

形, ADMM 算法要经过 110 次左右可以收敛到 ε , 而本文所提 A2DM2 算法仅需要迭代经过 62 次就可收敛到 ε , 从两者的对比可知, 相同情况下, A2DM2 算法的收敛速度更快, 更有利于应用大规模配电网的分布式优化计算。

4.3 优化调度结果分析

为了验证所提分布式有功无功协调优化算法对于系统不同状态下的适应性, 本节以实际全天光伏数据和负荷数据为基础, 分析各可控单元的出力对系统网损和电压幅值的优化结果。

图 6 为全天系统光伏有功功率出力曲线和系统负荷需求总功率曲线对比图, 其光伏渗透率^[15]达到了 128.52%。在 08:00—16:00 时间段内, 出现光伏功率倒送上级电网的现象, 不利于光伏的就地消纳和配电系统安全稳定运行。图 7 为全天系统各节点电压幅值, 在 10:30—13:15 时间段左右, 节点 11—16 和节点 27 以及节点 28 电压幅值均超过了安全范围, 大于 1.05, 电压质量问题比较突出。经过仿真计算发现, 单有功调度或单无功调度方法都已无法有效解决此问题, 需要采取有功无功协调优化控制手段调控电压。

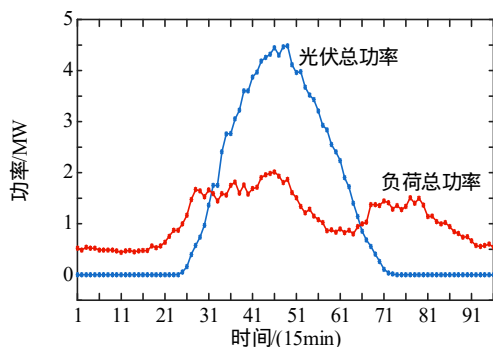


图6 光伏与负荷曲线

Fig. 6 Photovoltaic and load curves

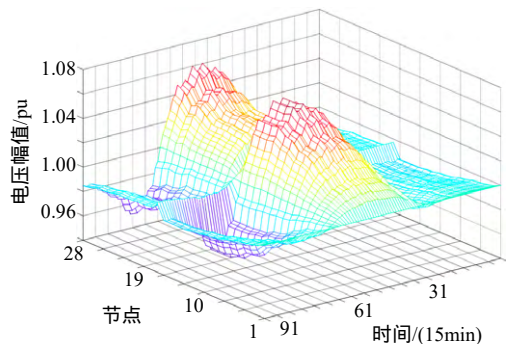


图7 全天节点电压幅值

Fig. 7 Voltage amplitude in all-day node

以分布式电源消纳最大化、电压偏差最小以及网络损耗最低为优化目标, 对区域配电网进行分区分布式实时优化。考虑到区域配电网内各可控设备的特性, 以及可再生能源和负荷的特性, 在实时优化阶段, 以 15min 作为调度周期, 每个优化阶段的求解算法采用 A2DM2 算法。各个区域的边界残差的收敛过程如图 8 所示, 当边界残差达到 10^{-4} 即认为算法收敛。经过实时优化后, 得到有源配电网内各可调设备的调度计划如图 9—11 示。

图 9 为储能有功功率的充放电功率。如图所示, 在 09:00—16:00 时间段附近, 由于光伏有功功率难以就被负荷消纳, 此时分别分布在 3 个区的功率

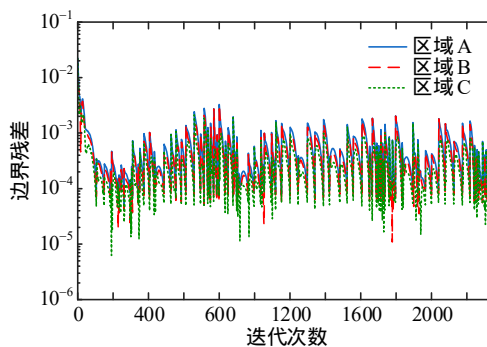


图8 边界残差收敛过程

Fig. 8 Boundary residual convergence process

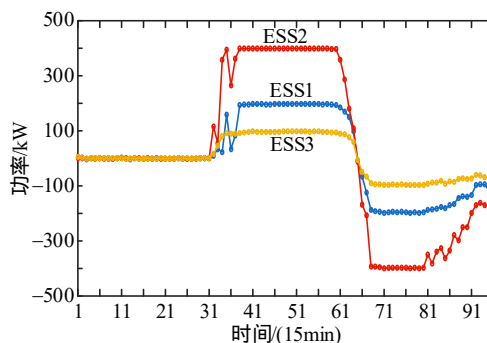


图9 储能有功出力

Fig. 9 Active power of energy storage

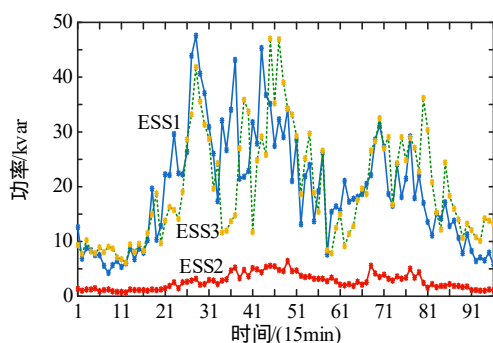


图10 储能无功出力

Fig. 10 Reactive power of energy storage

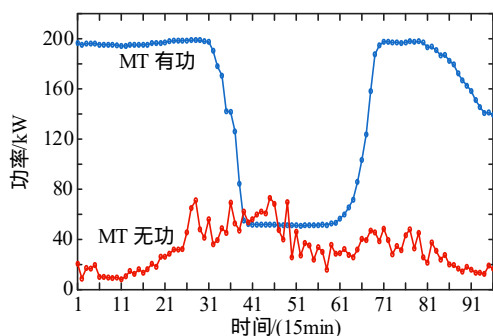


图11 微型燃气轮机有功无功出力

Fig. 11 Active and reactive power of micro gas turbine

型储能装置开始动作,将多余的光伏存储。16:00—24:00 时间段附近,由于日内负荷与可再生能源出力的波动,此时光伏难以维持负荷的需求,3 个区域的储能在 09:00—16:00 时间段附近将存储的能量释放,起到平抑功率波动的作用。区域 2 的储能 ESS2 在 21:00—24:00 时间段附近,由于负荷功率需求的逐渐变小,储能的放电功率同时变小。图 10 为储能全天无功出力波形,出力为正表示吸收无功,出力为负表示发出无功。区域 C 中没有电压越线,故区域 C 中的储能基本未发出吸收无功功率。图 11 为微型燃气轮机全天有功和无功出力波形,出力为正表示发出有功或无功。在 00:00—07:30 时间段和 15:25—24:00,光伏有用出力无法满足负荷功率的需求,此时主要通过微型燃气轮机的有功出力来提供,而 07:30—15:25 时间内的光伏出力较大,微型燃气轮机开始逐渐减少出力。

本文所提方法的优化目标是提高分布式电源的消纳水平,实现有功网络损耗的降低,提高系统运行的经济性,同时提高供电的可靠性,满足电力用户对于高质量电能的要求,最终的优化结果如图 12—14 所示。

图 12 为各时段优化前后系统与主电网交换功率的对比图,从图中可以明显看出,优化后系统与

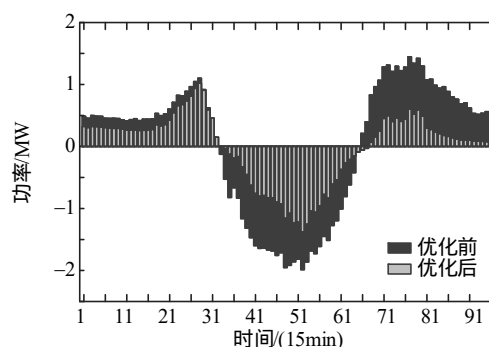


图12 PCC点交换功率

Fig. 12 PCC point exchange power

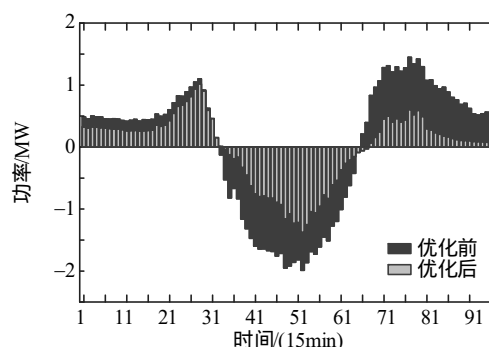


图13 网络损耗

Fig. 13 Network loss

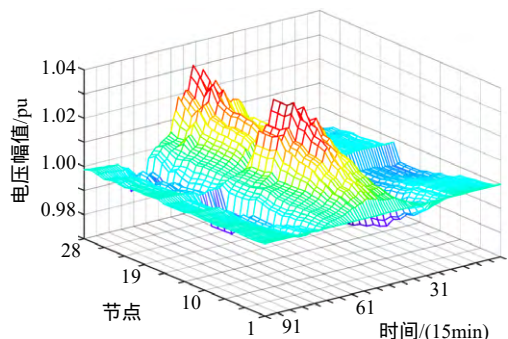


图14 优化后电压

Fig. 14 Optimized voltage

主电网的交换功率有了明显下降,证明本策略可以有效促进系统内可再生能源的自消纳水平;

图 14 为各时段优化前后系统内总网损的对比图。对比结果表明,经过有功无功协调优化后系统总网损明显降低,区域配电网全天的总损耗由优化前的 541.72kW·h 降为 217.7kW·h,下降了 62.95%,证明本文所提的分区分布式有源配电网有功无功协调优化能够有效地降低区域配电网内的线路损耗;对比图 7 和图 14,优化后各节点电压稳定在安全允许范围内,且系统的全天电压偏差量由 506.84 降为 179.77,降低了 64.53%,提高了系统的电能质量,有利于系统安全稳定运行。

4.4 不同负荷对优化结果的影响

上述分析中负荷是不可调的,为了进一步分析不同程度的负荷调控能力下配电网有功无功协调优化结果,表 4 展示了不同负荷可调容量分别占总负荷 5%、10%、20%的优化结果。

表 4 不同负荷对优化结果的影响

Tab. 4 Partitioning method of test system

可控负荷比例/%	电压指标/pu	网损/kW
5	168.78	207.82
10	159.69	190.93
20	142.82	172.16

从表 4 可以看出,不同负荷可控比例对所提分布式有功无功优化控制方法的优化结果存在不同程度的影响,总体趋势是可控负荷的比例越大,对优化结果的影响越明显。另外从优化结果可以看出,对负荷的调节能够有效增强配电网有功无功优化的调节能力,提高了系统的电压质量,降低了有功网络损耗。

4.6 分区结果对所提方法的影响

文献[15]所提的配电网分区方法为本文所提的基于分区协调的分布式有功无功优化调度控制方法提供了指导作用,但是所提方法对任何分区拓扑都是适用的。为了分析优化结果对于不同分区的敏感性,在上述测试系统上测试 3 种不同类型的分区对控制方法收敛性的影响。3 种类型的分区方式如表 5 所示。

表 5 测试系统的分区方式

Tab. 5 Partitioning method of test system

分区类型	联络线	分区个数
分区 1	8-9、6-18	3
分区 2	9-10、18-19	3
分区 3	8-9、6-18、8-24	5

分区 1 和分区 2 分区个数相同,但是区间联络线的选取是不同的,保持区域规模不变的情况下改变分区拓扑结构;分区 3 相比分区 1 和分区 2,增加了分区的规模。针对不同分区方式,所提方法的收敛次数和有功网损优化结果如表 6 所示。

从表 6 的数据可以看出,分区 2 和分区 1 相比,

表 6 分区方式对优化结果的影响

Tab. 6 Partitioning method of test system

分区类型	收敛次数	网损/kW
分区 1	2350	217.70
分区 2	2427	216.15
分区 3	3583	218.21

但是两者的收敛次数没有发生明显改变,证明系统分区个数相同的情况下,划分结果的改变不会对优化控制方法的收敛性产生明显的影响。分区 3 和分区 1 相比,随着分区个数的增加,类型 3 测试系统的收敛速度相比分区 1 和分区 2 明显减慢了,证明算法的收敛速度与分区个数有直接联系,且随着分区数的增多,其收敛次数会增多,但是两者之间的网损优化结果基本保持不变。

5 结论

本文针对主动配电网中多类型可调度资源的有功无功出力特性,考虑配电网运行的稳定性和经济性,以分布式电源消纳最大、网损最低、电压偏差最小为目标,构建了主动配电网分区分布式优化控制模型,并采用 A2DM2 算法进行优化求解,有效提升了计算效率。仿真结果表明,方法可以根据配电网分布式电源和负荷出力变化,实时统筹协调调度系统内可调资源的有功无功,降低了系统网络损耗和电压偏差,减少了与主电网交换功率,提高了主动配电网分布式能源自消纳水平。

所提出的主动配电网分区多目标主动调控策略,解决了配电网分区主动管理的边界耦合问题,降低了区域配电网的网络损耗,提高了供电电压合格率及分布式能源消纳水平。

所提出的基于 A2DM2 的主动配电网分区分布式调控方法,计及了配电网无功优化控制,并充分考虑了配电网中分布式电源的可调控资源,同时有效提升了模型的求解效率。

参考文献

- [1] 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(in Chinese).
- [2] 蒲天骄,刘克文,陈乃仕,等.基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3511-3521. Pu Tianjiao, Liu Kewen, Chen Naishi, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3511-3521(in Chinese).
- [3] 曾鸣,彭丽霖,王丽华,等.主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型[J].电力自动化设备,2016,36(6):108-115.

- Zeng Ming, Peng Lilin, 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(in Chinese).
- [4] 曹斌, 刘文霞, 王睿喆, 等. 考虑电网运行风险的发电电一体化调度方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2578-2584.
- Cao Bin, Liu Wenxia, Wang Ruizhe, et al. A Generation and Load Integrated Scheduling Method Considering Grid Operation Risk[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2578-2584(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 郭清元, 吴杰康, 莫超, 等. 基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1385-1396.
- Guo Qingyuan, Wu Jiekang, Mo Chao, et al. A Model for Multi-objective Coordination Optimization of Voltage and Reactive Power in Distribution Networks Based on Mixed Integer Second-order Cone Programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1385-1396 (in Chinese).
- [7] Li Pengcheng, Duan Xiaoyu, Yang Jing, et al. Coordinated EV charging and reactive power optimization for radial distribution network using mixed integer second-order cone programming[C]//Proceedings of 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific. Harbin: IEEE, 2017: 1-5.
- [8] 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(in Chinese).
- [9] 盛万兴, 季宇, 吴鸣, 等. 基于改进模糊 C 均值聚类算法的区域集中式光伏发电系统动态分群建模[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3284-3291.
- Sheng Wanxing, Ji Yu, Wu Ming, et al. Dynamic Clustering Modeling of Regional Centralized Photovoltaic Power Plant Based on Improved Fuzzy C-Means Clustering Algorithm[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3284-3291(in Chinese).
- [10] Zheng Weiye, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. A Fully Distributed Reactive Power Optimization and Control Method for Active Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [11] 梁俊文, 林舜江, 刘明波. 主动配电网分布式无功优化控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 230-237.
- Liang Junwen, Lin Shunjiang, Liu Mingbo. A Method for Distributed Optimal Reactive Power Control of Active Distribution Network[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 230-237(in Chinese).
- [12] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- Liu Yibing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. A Mixed Integer Second-order Cone Programming Based Active and Reactive Power Coordinated Multi-period Optimization for Active Distribution Network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583(in Chinese).
- [13] Yan Wei, Wen Lili, Li W, et al. Decomposition-coordination interior point method and its application to multi-area optimal reactive power flow[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(1): 55-60.
- [14] 欧阳聪, 刘明波, 林舜江, 等. 采用同步型交替方向乘子法的微电网分散式动态经济调度算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 134-142.
- Ouyang Cong, Liu Mingbo, Lin Shunjiang, et al. Decentralized Dynamic Economic Dispatch Algorithm of Microgrids Using Synchronous Alternating Direction Method of Multipliers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 134-142(in Chinese).
- [15] 肖传亮, 赵波, 周金辉, 等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 147-155.
- Xiao Chuanliang, Zhao Bo, Zhou Jinhui, et al. Network partition based cluster voltage control of high-penetration distributed photovoltaic systems in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 147-155(in Chinese).



寇凌峰

收稿日期: 2019-05-09。

作者简介:

寇凌峰(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事分布式能源、微网优化规划与系统评估技术研究, klf0927@126.com;

吴鸣(1981), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事分布式发电和交直流混合微电网关键技术、分布式供能系统研究。

(实习编辑 宋钰龙)

Optimization and Control Method of Distributed Active and Reactive Power in Active Distribution Network

KOU Lingfeng¹, WU Ming¹, LI Yang³, QU Xiaoyun¹, XIE Hui², GAO Bo², CHEN Fan², HU Cungang³

(1. China Electric Power Research Institute; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company;
3. Anhui University)

KEY WORDS: distributed generation; active and reactive power coordinated optimal dispatch; accelerated alternating direction method of multipliers (A2DM2); global optimum

With a large number of distributed generations such as wind power generation and photovoltaic power generation connected to the distribution network, the traditional distribution network is changing from one-way power supply distribution network to active distribution network with bidirectional power flow. Compared with the traditional distribution network control, the active distribution network needs to ensure safe and stable operation of the system. By the regulation of multiple types of distributed power sources and equipment in the system, the self-absorption capacity of the distributed energy resource can be improved in the system, and the impact of distributed generation on the main power grid can be reduced. At present, the domestic and overseas researches on distributed optimization of distribution network mainly focus on the level of reactive power optimization. However, the active distribution network with large-scale distributed generations has a strong coupling of active and reactive power. Thus, it is necessary for the active distribution network to implement the coordinating and optimal control of active and reactive power.

Aiming at solving the above mentioned problems, in this paper, a distributed active control strategy is proposed which takes the distributed control concept and active and reactive power coordinated scheduling into consideration. Firstly, the active distribution network is reasonably divided into several regions. Each region is equipped with a controller, which takes the minimum active loss and voltage deviation as the multi-objective function. Then, the algorithm of accelerated alternative direction method of multipliers (A2DM2) is used for optimization solution. The distributed solution can be obtained by the collection of local information and the exchange of neighbor coupling branch information. Finally, the approximate global optimal solution can be obtained by iterative calculation.

According to the characteristics of active and reactive power output of multiple types of schedulable distributed energy resources in the active distribution network, a partition distributed optimal control model for active distribution network which is aiming at maximizing the consumption of distributed power and minimizing the network loss and the voltage deviation is constructed in this paper by considering the stability and economy of distribution network operation. The A2DM2 algorithm is utilized for the optimal control model solving, and the calculation efficiency are effectively improved. The simulation results show that the method can achieve real-time coordination between the active and reactive power of the adjustable resources in the dispatching system according to the power fluctuations of the distributed generations and loads in the distribution network. The network loss, voltage deviation and the exchange power with the main grid of the system are reduced. In addition, the self-consumption level of the distributed energy resources in the active distribution network is improved.

The proposed multi-objective active control strategy solves the boundary coupling problem of the active management of the distribution network. The network loss of the regional distribution network is reduced, and the power supply voltage qualification rate and the level of distributed energy consumption are improved.

Based on A2DM2, a distributed control method of active distribution network is proposed in this paper. It takes the reactive power optimization control of distribution network into account, and fully considers the adjustable resources of distributed generation in distribution network. By using A2DM2, the efficiency of the optimal control model solving is effectively improved.