

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.01.006

智能电网多层次优化方法研究

王 重, 刘 斌, 练红海, 谷 飞

(湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 提出了将分布式能源、可再生能源和能源存储设备连接到微电网的一种多层次优化方法, 构建了一个用于降低计算复杂度、优化不同分散的微电网、不同的决策者和多目标结构的多层次结构体系。该体系将多层次结构体系连接到系统控制网络的智能电网, 多层次结构体系的上层决策层具有一组固定的参数(参考值)函数, 并通过特定的控制策略结构来适应较低的决策水平, 根据这一参数, 每个较低级别的决策者通过跟踪上层决策者所提供的参考值解决自身的优化问题。软件模拟仿真结果显示, 多层次结构体系的运用, 不仅在智能电网中优化了运行时间, 而且对电网能量进行了优化管理, 降低了能源消耗。

关键词: 智能电网; 微电网; 多层次结构; 控制策略

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)01-0029-07

Study on Multilevel Optimization Approach for Smart Grids

WANG Zhong, LIU Bin, LIAN Honghai, GU Fei

(School of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: A multilevel optimization approach is proposed to connect distributed energy, renewable energy and energy storage devices to microgrid. A multilevel architecture system is constructed to reduce the computational complexity and optimize different decentralized microgrids, different decision makers and multiple objectives construction. This architecture system connects the multilevel structure system to the system control network of smart grids, the upper decision level of multilevel architecture system has a set of fixed parameter (reference values) function, and adapts to the lower decision level by a specific structure of the control strategy. On the basis of the parameters, each decision maker at the lower level solves its own optimization problem by tracking the reference values provided by the upper level. Software simulation results show that the application of multi-level structure system not only optimizes the running time in the smart grid but also optimizes the power grid energy management and reduces energy consumption.

Keywords: smart grid; microgrid; multilevel architecture; control strategy

1 问题提出

随着科学技术的不断发展, 人们对微电网的智能化程度要求越来越高, 多阶微电网组成的智能电网也应运而生。对于现在的智能电网, 其在运行控制方面的技术已经足够成熟与完善, 但多阶微电网

在组建智能电网时缺乏统一的数学模型和控制与优化的鲁棒性工具^[1-2], 因而电网的结构尚需要进行进一步优化与改进。

本课题组成员在进行实时优化控制时发现, 构建一个有效实时控制方案的难度主要基于电网的结

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174075), 湖南工业大学研究生创新基金资助项目(CX0914)

作者简介: 王 重(1991-), 男, 湖北仙桃人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为微电网的能量管理与优化, 混杂系统与脉冲系统的鲁棒性与稳定性分析, E-mail: 1070768405@qq.com

构,特别需要解决可再生能源、传统的电力供电、双向功率流、动态存储系统、随机建模以及可再生能源预测的不确定性问题。如果整个系统所有的结构问题在一个完整的体系中同时出现,将引出一个很难处理的实时优化控制问题,因而怎样决策处理结构问题是解决这一问题的关键。因此,本文拟从智能电网的结构着手,构建一个由多阶微电网组成的多层次结构体系的智能电网,并将其分布式功率流进行优化控制。

本文提出以一种多层次结构体系来解决现有电网结构中存在的问题,该体系的上层决策层(upper level decision maker, UDM)为具有固定的某组参数(参考值)函数,通过假设一个特定的控制策略结构,以适用于下层决策层(lower level decision makers, LDMs),根据这一参数,每个下层决策者通过跟踪上层决策层所提供的参考值来解决其自身的优化问题。为此,本研究对此多层次结构体系的组成提出如下要求:上层决策层具有协调切换控制下层决策层的功能,它的每个部分与微电网相关。在这个方案中,上层决策层考虑了微电网动态系统不能全部呈现的细节问题,同时也要解决这些细节问题。在一些智能电网的相关文献中,研究者提出将聚合模型运用到智能电网中,并介绍了近似的电气约束条件^[3-6]。而本文提出的多层次结构体系,其在原则上可以用于任何类型的电网配置。此外,在此方案中有2个鲜明的特点:其一为UDM将LDMs视为单个节点,另一个为它不同于文献[7]和[8]中提出的关于UDM的决策问题和局部控制策略在结构和参数上被约束。当UDM决策问题得到解决后,所得的解决方案用于解决低层次问题,充分考虑了电网系统的复杂性和电网对应所在子系统的电气约束。不过已有的工作方案虽然有利于计算运行时间,但具有一定程度的次优性,主要源于在更高层的决策问题中引入了对应的较低级别的结构体系约束环节。这种解决方案已经通过实验证明了它的可行性,运行时不会引起重大电气事故。

本研究中,将多层次结构体系中的主电网构建成了环型的中级线电压(medium voltage, MV)模型,低层次的电气系统由低压(low voltage, LV)线相连的LV-MV变电站构成。文献[9]中给出了电网的有功功率流和无功功率流的一般模型,本文根据该模型建立了LDMs决策问题的模型。同时,本研究中将UDM决策问题的模型设定为一个直流分布网络^[10-11]。一次构建的多层次结构体系通讯更加简便,将大大缩短运行时间。

2 LDMs 的决策问题

微电网的决策问题与特定的微电网的供电设备和存储系统运行管理有关。微电网在实际应用中也有各种各样的数学模型,如文献[3-4]中的聚合模型等,本文选取了一个 m 阶微电网在区间 $(t, t+1)$ 上从节点 a 传输到节点 b 的功率流模型。在每个节点处,其功率平衡的方程式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{h=1}^{H_{F,m}} P_{F,h,a,t}^m + \sum_{h=1}^{H_{R,m}} P_{RES,h,a,t}^m + \sum_{k=1}^{K_{m,a}} P_{S,k,a,t}^m - \\ P_{D,a,t}^m + P_{grid,a,t}^m + \sum \Delta P = \sum_{b \in A_{m,a}} P_{a,b,t}^m, \\ \sum_{h=1}^{H_{F,m}} Q_{F,h,a,t}^m + \sum_{h=1}^{H_{R,m}} Q_{RES,h,a,t}^m + \sum_{k=1}^{K_{m,a}} Q_{S,k,a,t}^m - \\ Q_{D,a,t}^m + Q_{grid,a,t}^m + \sum \Delta Q = \sum_{b \in A_{m,a}} Q_{a,b,t}^m \end{array} \right. \quad (1)$$

式(1)中:

$a=1, 2, \dots, N_m$; $b=1, 2, \dots, N_m$; $t=0, 1, \dots, T-1$; 其中 N_m 为 m 阶微电网的节点数;

$A_{m,a}$ 为在节点 a 附近且与节点 a 相接的节点 b 的不同阶的个数集合;

$P_{F,h,a,t}^m$ 为可控发电设备位于节点 a 附近的 m 阶微电网在区间 $(t, t+1)$ 内的有功功率,其中 $h=1, 2, \dots, H_{F,m}$, 而 $H_{F,m}$ 为位于节点 a 附近的可控发电设备的数量;

$P_{RES,h,a,t}^m$ 为被注入到节点 a 附近的 m 阶微电网中的可再生能源的有功功率,其中 $h=1, 2, \dots, H_{R,m}$, 而 $H_{R,m}$ 为可再生能源设备的数量;

$P_{S,k,a,t}^m$ 为位于节点 a 附近的第 k 个能源存储设备的有功功率,其中 $k=1, 2, \dots, K_{m,a}$, 而 $K_{m,a}$ 为能源存储设备的数量;

$P_{D,a,t}^m$ 为线路负载总有功功率;

$P_{grid,a,t}^m$ 为主电网的有功功率;

$Q_{F,h,a,t}^m$, $Q_{RES,h,a,t}^m$, $Q_{S,k,a,t}^m$, $Q_{D,a,t}^m$, $Q_{grid,a,t}^m$ 分别为相应的无功功率;

ΔP , ΔQ 分别为外界干扰或系统自身引起的附加额外有功功率和无功功率;

$P_{a,b,t}^m$, $Q_{a,b,t}^m$ 分别为 m 阶微电网从节点 a 传输到节点 b 的有功功率流和无功功率流,它们与视在功率 S_b (kV·A)存在如下关系:

$$P_{a,b,t}^m = p_{a,b,t}^m S_b,$$

$$Q_{a,b,t}^m = q_{a,b,t}^m S_b,$$

其中 $p_{a,b,t}^m$, $q_{a,b,t}^m$ 分别为有功和无功的功率因数。

功率因数的计算表达式参照文献[5]给出,具体描述如下:

$$\begin{cases} p_{a,b,t}^m = \frac{r_{a,b}^m (v_{a,t}^m)^2}{(r_{a,b}^m)^2 + (\hat{r}_{a,b}^m)^2} - \frac{v_{a,t}^m v_{b,t}^m [r_{a,b}^m \cos(\bar{\delta}_{a,b,t}^m) - \hat{r}_{a,b}^m \sin(\bar{\delta}_{a,b,t}^m)]}{(r_{a,b}^m)^2 + (\hat{r}_{a,b}^m)^2}; \\ q_{a,b,t}^m = \frac{\hat{r}_{a,b}^m (v_{a,t}^m)^2}{(r_{a,b}^m)^2 + (\hat{r}_{a,b}^m)^2} - \frac{v_{a,t}^m v_{b,t}^m [\hat{r}_{a,b}^m \cos(\bar{\delta}_{a,b,t}^m) - r_{a,b}^m \sin(\bar{\delta}_{a,b,t}^m)]}{(r_{a,b}^m)^2 + (\hat{r}_{a,b}^m)^2}. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $a=1, 2, \dots, N_m$; $b=1, 2, \dots, N_m$, 且 $a \neq b$;
 $t=0, 1, \dots, T-1$;

$$\bar{\delta}_{a,b,t}^m = \delta_{a,t}^m - \delta_{b,t}^m;$$

$r_{a,t}^m$ 和 $r_{b,t}^m$ 分别为节点 a 和节点 b 的阻抗参数;

$v_{a,t}^m$ 和 $\delta_{a,t}^m$ 分别为节点 a 电压的幅值和相位。

存储系统的状态方程为

$$x_{a,k,t+1}^m = \eta_{a,k,t} x_{a,k,t}^m - P_{S,k,a,t}^m \Delta. \quad (3)$$

式(3)中: $a=1, 2, \dots, N_m$; $b=1, 2, \dots, N_m$, 且 $a \neq b$;
 $t=0, 1, \dots, T-1$;

$x_{a,k,t}^m$ 为节点 a 在时刻 t 的第 k 个存储系统储存的能量;

$\eta_{a,k,t}$ 为节点 a 在时刻 t 的第 k 个存储系统储存能量的效率因数;

Δ 为离散时间间隔。

决策问题在 m 阶微电网中的目标函数 (LDM-AC) 如下:

$$\begin{aligned} J_{\text{LDMgrid},m} = & \sum_{t=0}^{T-1} \left[\beta_m \left(\sum_{a=1}^{N_m} P_{F,a,t}^m - \bar{p}_m^{\text{UDM}} \right)^2 + \right. \\ & \alpha_m \left(\sum_{a=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{K_{m,a}} x_{a,k,t}^m - \bar{x}_m^{\text{UDM}} \right)^2 + \\ & \left. \gamma_m \left(\sum_{a=1}^{N_m} P_{\text{grid},a,t}^m - \bar{u}_m^{\text{UDM}} \right)^2 \right]. \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m$ 均为加权因子;

$\bar{p}_m^{\text{UDM}}, \bar{x}_m^{\text{UDM}}, \bar{u}_m^{\text{UDM}}$ 为 UDM 提供的参考值。

除了表达式(1)(3)(4)外, LDM 决策问题必须考虑有关边界状态和控制变量、以及有功功率、无功功率和容量的限制, 如文献[6]所示:

$$\begin{cases} v_a^{m,\min} \leq v_{a,t}^m \leq v_a^{m,\max}, \\ \sqrt{(P_{F,a,t}^m)^2 + (Q_{F,a,t}^m)^2} \leq S_{F,a}^{m,\max}, \\ \sqrt{(P_{\text{grid},a,t}^m)^2 + (Q_{\text{grid},a,t}^m)^2} \leq S_{\text{grid},a}^{m,\max}, \\ \sqrt{(P_{\text{RES},a,t}^m)^2 + (Q_{\text{RES},a,t}^m)^2} \leq S_{\text{RES},a}^{m,\max}, \\ \sqrt{(P_{D,a,t}^m)^2 + (Q_{D,a,t}^m)^2} \leq S_{D,a}^{m,\max}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_{a,k}^{m,\min} \leq x_{a,k,t}^m \leq x_{a,k}^{m,\max}, \\ \sqrt{(P_{S,a,k,t}^m)^2 + (Q_{S,a,k,t}^m)^2} \leq S_{S,a,k}^{m,\max}. \end{cases} \quad (6)$$

$$\sqrt{(P_{a,b,t}^m)^2 + (Q_{a,b,t}^m)^2} \leq S_{a,b}^{m,\max} = \sqrt{3} V_{a,b}^m I_{a,b}^{m,\max}. \quad (7)$$

式(5)~(7)中: $a=1, 2, \dots, N_m$; $t=0, 1, \dots, T-1$; $k=1, 2, \dots, k_{m,a}$; $b=1, 2, \dots, N_m$, 且 $a \neq b$;

$v_a^{m,\min}$ 和 $v_a^{m,\max}$ 为技术上的限制电压;

$S_{F,a}^{m,\max}, S_{\text{grid},a}^{m,\max}, S_{\text{RES},a}^{m,\max}, S_{D,a}^{m,\max}, S_{S,a,k}^{m,\max}$ 均为额定视在

功率, $\text{kV} \cdot \text{A}$;

$I_{a,b}^{m,\max}$ 为流经节点 a 到节点 b 的最大电流幅值;

$V_{a,t}^m = v_{a,t}^m V_b$, 其中 V_b 为基准电压;

$x_{a,k}^{m,\min}, x_{a,k}^{m,\max}, S_{S,a,k}^{m,\max}$ 均为固定的技术指标参数。

3 UDM 决策问题与无约束 LDM 策略

UDM 的决策问题是实现经济成本、二氧化碳排放量的成本和连接损耗的加权和最最小化。针对这些问题, 本文建立了一个相应的决策模型, 该模型包括 M 个节点, $P_{a,b,t}$ 为其决策变量, 表示从节点 a 到节点 b 的功率流, $P_{a,t}$ 为可控发电设备位于节点 a 附近的 m 阶微电网在区间 $(t, t+1)$ 上的功率流, 其中 $a=1, 2, \dots, \hat{M}$, $\hat{M}$ 为微电网的数目, 最小化的目标函数如下:

$$\begin{aligned} \min J_{\text{UDM-DP}} = & \sum_{t=0}^{T-1} \left\{ \sum_{a=1}^{\hat{M}} [(C_{a,t} + f_e f_x C_{\text{CO}_2}) \Delta \max(U_{a,t}, 0) - \right. \\ & B_{a,t} \Delta \max(-U_{a,t}, 0) + g_a(P_{a,t}) + \\ & \left. f_p \frac{f_{e,a} f_{o,a}}{LHV_a} P_{a,t} \eta_a C_{\text{CO}_2} \Delta] + \right. \\ & \left. \sum_{a=1}^M \tilde{C}_{a,t} \sum_{b \in M_a} R_{a,b} I_{a,b,t} \Delta \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

式中: M_a 为在 UDM 电网中与节点 a 邻近的所有节点的集合;

$C_{a,t}$ 为由一个微电网向大电网购买电能而付出的单位成本, 元 / ($\text{kW} \cdot \text{h}$);

$B_{a,t}$ 为由一个微电网向大电网售出电能而得到的单位利益, 元 / ($\text{kW} \cdot \text{h}$);

f_e 为排放因子, kg/m^3 ;

$f_x = 10^{-3} \eta_x$, 其中 η_x 为与电能输送有关的效益值;

C_{CO_2} 为每排放单位数量 CO_2 的花费, 元 / t ;

$g_a(P_{a,t})$ 为可控电力设备电能输出成本;

f_p 为换算系数, 且 $f_p = 10^{-3}$;

$f_{e,a}, f_{o,a}$ 分别为燃料在节点 a 的排放因子和氧化因子, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;

LHV_a 为使用可燃性较低的燃料的热值, 单位为 $(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$;

η_a 为加权因子;

$\tilde{C}_{a,t}$ 为从节点 a 到节点 b 产生的电能损耗的单位成本。

对 m 阶微电网建模, 将其形成的智能电网作为一个单一的整体, 则可用一个线性状态方程代表每个子系统 / 微电网的动态:

$$x_{a,t+1} = c_a x_{a,t} + (P_{a,t}^U - P_{a,t}^D + P_{a,t} + P_{a,t}^E) \Delta. \quad (9)$$

式 (9) 中: $a=1, 2, \dots, N_m$; $t=0, 1, \dots, T-1$;

c_a 为节点 a 的存储功耗因子;

$P_{a,t}^U$ 为国家电网的发出功率;

$P_{a,t}^D$ 为微电网的负载功率;

$P_{a,t}$ 为节点 a 提供的有功功率,

$P_{a,t}^E$ 为其他设备注入的有功功率。

在 UDM 电网中, 节点 a 的功率消耗平衡方程为

$$P_{a,t}^{\text{ext}} = P_{a,t}^{\text{U, ext}} + P_{a,t}^{\text{D, ext}} + \sum_{b \in M_a} P_{a,b,t}^{\text{ext}} \quad (10)$$

式 (10) 中: $a=1, 2, \dots, M$; $t=0, 1, \dots, T-1$;

$P_{a,t}^{\text{ext}}$ 为总吸收功率;

$P_{a,t}^{\text{U, ext}}$ 为国家电网的吸收功率;

$P_{a,t}^{\text{D, ext}}$ 为微电网的负载消耗功率;

$P_{a,b,t}^{\text{ext}}$ 为 UDM 电网中吸收的功率流。

UDM 电网的附加成本的最小化表达式 (8) 受如下电力约束 ($P_{a,b,t} = p_{a,b,t} S_b$):

$$P_{a,b,t} = \frac{\delta_{a,t} - \delta_{b,t}}{\hat{r}_{a,b}} S_b, \quad (11)$$

$$-U_{\min, a,t} \leq U_{a,t}^{\text{out}} \leq U_{\max, a,t}, \quad (12)$$

$$-\hat{U}_{\min, a,t} \leq U_{a,t}^{\text{in}} \leq \hat{U}_{\max, a,t}, \quad (13)$$

$$-P_{a,b,t}^{\min} \leq P_{a,b,t} \leq P_{a,b,t}^{\max}, \quad (14)$$

$$0 \leq P_{a,t} \leq P_{a,t}^{\max}, \quad (15)$$

$$x_{\min, a,t} \leq x_{a,t} \leq x_{\max, a,t} \quad (16)$$

式 (11) ~ (16) 中: $a=1, 2, \dots, N_m$; $t=0, 1, \dots, T-1$;

$k=1, 2, \dots, k_{m,a}$; $b=1, 2, \dots, N_m$, 且 $a \neq b$ 。

所有参数表达式 (12) ~ (16) 是从当前评估范围内进行界定的, 决策问题则是在表达式 (9) ~ (16) 的约束条件下实现表达式 (8) 的最小化。

4 约束的 UDM 决策问题

对于 UDM 的优化问题, 可以引入额外的约束模型, 通过仿真得到 LDMs 的具体决策方案。假定每个 LDM 的控制策略可以嵌入 UDM 中, 每个 LDM 的决策方案都可以间接解决一个问题 (LDM-E), 在这一条件下, 节点 a 的 LDM 优化问题在理论上对应的

加权偏差总和的表达式为:

$$J_{\text{LDM-E}, a} = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^{T-1} \left[\beta_a (P_{a,t} - \bar{p}_a)^2 + \alpha_a (x_{a,t+1} - \bar{x}_a)^2 + \gamma_a (P_{a,t}^U - \bar{p}_a^U)^2 \right]. \quad (17)$$

式中: $\bar{p}_a$, $\bar{x}_a$, $\bar{p}_a^U$ 分别为对应的参考值。

为了使提供的 LDM-E 问题更加标准化, 本研究提出如下假设:

$$\begin{cases} \underline{w}_{a,t} = [P_{a,t}^U, P_{a,t}]^T; \\ \underline{\bar{w}}_a = [\bar{p}_a^U, \bar{p}_a]^T; \\ \underline{z}_{a,t} = \underline{e}_{a,t} - \underline{d}_{a,t} \circ \end{cases} \quad (18)$$

$$\min J_{\text{LDM-E}, a} = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^{T-1} \left[(\underline{x}_{a,t+1} - \bar{x}_a)^T \underline{Q}_a (\underline{x}_{a,t+1} - \bar{x}_a) + (\underline{w}_{a,t} - \bar{w}_a)^T \underline{R}_a (\underline{w}_{a,t} - \bar{w}_a) \right]; \quad (19)$$

$$\underline{x}_{a,t+1} = \underline{c}_a \underline{x}_{a,t} + \underline{B}_a \underline{w}_{a,t} + \underline{g} \underline{z}_{a,t} \circ \quad (20)$$

式 (18) ~ (20) 中: $t=0, 1, \dots, T-1$;

$\underline{c}_a$ 为过渡矩阵;

$\underline{Q}_a$ 是一个标量矩阵, 且 $\underline{Q}_a = \alpha_a$;

$\underline{R}_a = \begin{pmatrix} \gamma_a & 0 \\ 0 & \beta_a \end{pmatrix}$, $\underline{B}_a = [\Delta \quad \Delta]$, $\underline{g} = \Delta$, 并且此处假设该序列为 $\underline{z}_{a,t}$, 其中 $t=0, 1, \dots, T-1$, $\underline{x}_{a,t}$ 的初始状态为 $\underline{x}_{a,0}$ 。

对于 LDM-E_a 控制问题的最优控制规律, 由如下表达式给出:

$$\begin{aligned} \underline{w}_{a,k} = & -(\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{c}_a \underline{x}_{a,k} + \\ & \left((\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a \underline{R}_a^{-1} \underline{B}_a^T - \underline{R}_a^{-1} \underline{B}_a^T \right) \underline{g}_{a,k+1} - \\ & (\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a \bar{\underline{w}}_a + \bar{\underline{w}}_a - \\ & (\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{g} \underline{z}_{a,k} \circ \end{aligned} \quad (21)$$

式 (21) 中 $k=0, 1, \dots, T-1$ 。

$\underline{K}_{a,k}$ 和 $\underline{g}_{a,k}$ 可以通过以下公式向后递推得到:

$$\begin{cases} \underline{K}_{a,k} = \underline{Q}_a + \underline{c}_a \left(\underline{K}_{a,k+1} - \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a (\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \right) \underline{c}_a; \\ \underline{g}_{a,k} = -\underline{c}_a \left(\underline{K}_{a,k+1} - \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a (\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \right) \underline{g}_{a,k+1} + \underline{c}_a \cdot \\ \quad \left(\underline{K}_{a,k+1} - \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a (\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \right) \underline{g}_{a,k+1} + \underline{c}_a \cdot \\ \quad \left(\underline{K}_{a,k+1} - \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a (\underline{R}_a + \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \underline{B}_a)^{-1} \underline{B}_a^T \underline{K}_{a,k+1} \right) (\underline{B}_a \bar{\underline{w}}_a + \underline{g} \underline{z}_{a,k}) - \underline{Q}_a \bar{\underline{x}}_a \circ \end{cases} \quad (22)$$

式 (22) 中 $k=0, 1, \dots, T-1$ 。

$\underline{K}_{a,k}$ 和 $\underline{g}_{a,k}$ 的初始化如下:

$$\underline{K}_{a,T} = \underline{Q}_a, \underline{g}_{a,T} = -\underline{Q}_a \bar{\underline{x}}_a \circ$$

对应的解决方案 (21) 和 (22) 为每个微电网必须强加在 UDM 问题的约束条件, 也就是如下表达式:

$$\begin{cases} \underline{w}_{a,k} = H_{a,k}^x \underline{x}_{a,k} + H_{a,k}^g \underline{g}_{a,k+1} + H_{a,k}^{\bar{w}} \underline{\bar{w}}_a + H_{a,k}^z \underline{z}_{a,k}, \\ \underline{g}_{a,k} = M_{a,k}^x \underline{\bar{x}}_a + M_{a,k}^{\bar{w}} \underline{\bar{w}}_a + M_{a,k}^z \underline{z}_{a,k} + M_{a,k}^g \underline{g}_{a,k+1} \end{cases} \quad (23)$$

式(23)中: $a=1, 2, \dots, N_m$; $k=1, 2, \dots, T-1$;

$H_{a,k}^x, H_{a,k}^g, H_{a,k}^{\bar{w}}, H_{a,k}^z, M_{a,k}^x, M_{a,k}^{\bar{w}}, M_{a,k}^z, M_{a,k}^g$ 均为已知矩阵或参数。

5 实例仿真

为验证所提模型的有效性, 搭建了一个多层次结构体系的智能电网模型进行实例仿真。所搭建模

型由多阶微电网组成, 同时, 考虑到多层次结构体系可被应用于不同的案例研究, 故本文采用将邻近的电网连接到配电网。实例仿真中, UDM 电网由 15 kV 供电电压结构构成母线, LDMs 电力系统由 400 V 供电电压结构构成, 并通过 LV-MV 变压器与 UDM 电网相连。本次建模中, 一个系统包括 3 个微电网, 并将由 3 个微电网构成的 UDM (见图 1, 图中单位为 MW) 电网全部与不同的中压/低压变电站相连, 且将每个变电站连接到外部电网并提供一个负载。此外, 微电网 1~3 完全互连。

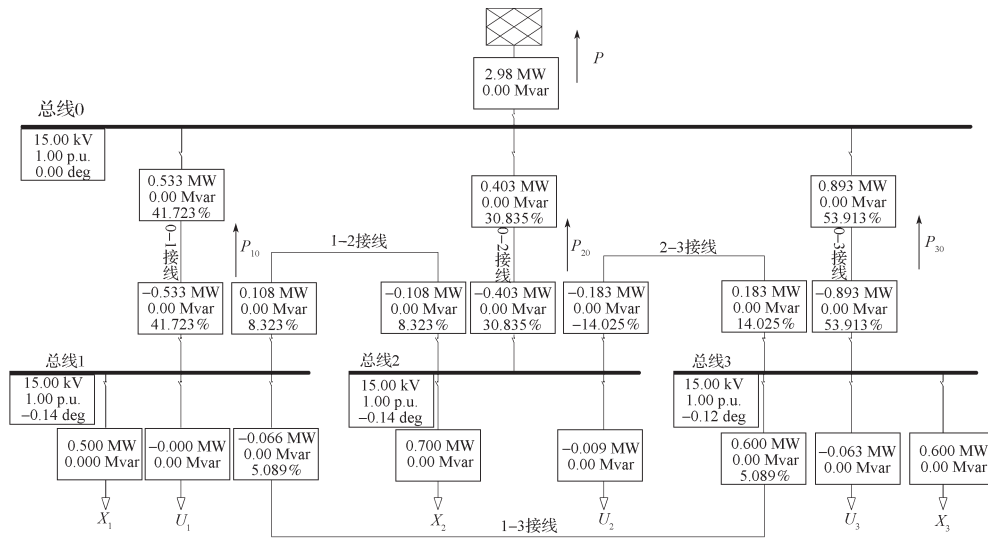


图1 $t=1$ 时智能电网模型的直流负载流动静态图

Fig. 1 DC-load flow static diagram of smart grid model at $t=1$

5.1 多层次的 UDM-LDMs 解决方案

式(8)中的生产成本为 $g_a(p_{a,t}) = p_{a,t} \eta_a \bar{C}_a \Delta$, 其中 $\bar{C}_a$ 为被用于产生电能的主要能源的单位成本。

电力消耗模式来源于真实的数据和估计。此外, 就该智能电网而言, 可再生实用性模式以 60 min ($T=4$) 为时间周期, 时间间隔 $\Delta=0.25$ h (15 min), 对于不同的微电网, 其最大输入功率分别为 330, 100, 200 kW。外部负载的 3 个变电站是不随时间变化的, 其额定功率分别为 500, 700, 600 kW。用特征控制策略(23)得到的参数解决 LDM-E 问题, 该过程运用 MATLAB 软件计算解决, 所得微电网的功率流最优结果如表 1 所示。

表 1 微电网中的功率最优结果

时间/15 min	$P_{12,t}/\text{kW}$	$P_{13,t}/\text{kW}$	$P_{23,t}/\text{kW}$
0	110.23	-66.43	-184.15
1	108.31	-66.03	-182.13
2	105.89	-75.78	-180.12
3	103.58	-65.57	-178.30

此外, 每个微电网和外电网之间的电力交换功

率如表 2 所示, 可控发电设备的发出功率如表 3 所示, 电能的存储状态如表 4 所示。通过使用 DigSilent 软件, 运用逼近的方法得出了最优结果, 特别是所有的输入参数(负荷、可再生能源等)、从可控发电设备得到的最优值以及向外部电网注入的电能, 然后, 分别将这些数据(见表 2~4)输入 DigSilent 软件中, 得到输出线路的最佳功率流。

表 2 从微电网到外电网的功率流

时间/15 min	$P_{1,t}^U/\text{MW}$	$P_{2,t}^U/\text{MW}$	$P_{3,t}^U/\text{MW}$
0	0	-2.90	-62.90
1	-0.17	-8.80	-62.70
2	0	-14.70	-62.70
3	-0.01	-20.30	-62.70

表 3 可控发电设备发出功率

时间/15 min	$P_{12,t}/\text{kW}$	$P_{13,t}/\text{kW}$	$P_{23,t}/\text{kW}$
0	110.23	-66.43	-184.15
1	108.31	-66.03	-182.13
2	105.89	-75.78	-180.12
3	103.58	-65.57	-178.30

表4 电能储存状态

Table 4 Electrical energy storage state

时间 / 15 min	$x_{1,t}/\text{kW}$	$x_{2,t}/\text{kW}$	$x_{3,t}/\text{kW}$
0	0	0	0
1	17.17	3.40	14.28
2	30.72	0	6.19
3	20.39	7.15	8.09

5.2 多层次方法与集中式方法

以集中式方法和多层次方法运行软件, 所得上层决策层的运行时间和所获得的目标函数值(成本)结果如表5所示。

表5 集中式方法与多层次方法的运行效率比较

Table 5 Operation efficiency comparison of the centralized method and the multilevel method

时间 / 15 min	运行时间 / s		成本 / 万元	
	集中式	多层次	集中式	多层次
1	3	3	1.12	1.12
2	18	10	10.85	11.39
3	90	12	15.69	17.57
4	420	20	24.94	25.90

分析表5中的数据可以得知, 同一时间点下, 采用多层次方法解决问题所需成本略高于以集中式方法解决问题所需的成本, 但相差不大, 即采用这2种方法解决问题的效果相差不大; 然而, 多层次方法的运行时间相比于集中式方法的存在较大差距, 随着时间的增大, 多层次方法的运行时间比集中式的要大为缩短。

当增加多阶微电网的数量(N)时, 上层决策层的运行时间和所获得的目标函数值(成本)的结果如表6所示。

表6 多阶微电网下集中式方法与多层次方法的运行效率比较

Table 6 Operation efficiency comparison of the centralized method and the multilevel method on the multi-channel microgrid

N	时间 / 15 min	运行时间 / min		成本 / 万元	
		集中式	多层次	集中式	多层次
7	4	24.0	0.6	40.25	43.42
10	4	136.0	1.0	120.00	125.00
5	5	23.0	0.6	24.88	26.26
5	6	56.0	1.0	32.82	36.64
5	7	>360.0	2.5	36.76	43.97

分析表6所示结果, 可得知当多阶微电网的数量增加时, 采用多层次方法仍然可以减少上层决策层的运行时间; 但是其运行成本略有增加。因此, 在实际的电力配送中, 应根据具体要求选择合适的处理方法。

5.3 LDMs的最优解决方案

UDM 决策问题的结果为 LDMs 决策问题提供了

参考值, 3个不同的微电网被作为仿真对象, UDM 电网与微电网交换功率的最优值见表7, 分析表7中的数据可知, 表中数据与表2中的数据非常相近, 即所得值非常相似于UDM的参考值。

表7 微电网交换功率最优结果表

Table 7 Optimal results of microgrids switching power

时间 / 15 min	$P_{1,t}^U/\text{MW}$	$P_{2,t}^U/\text{MW}$	$P_{3,t}^U/\text{MW}$
0	0	-2.90	-62.900
1	-0.168	-8.80	-62.700
2	0	-14.70	-62.700
3	0.010	-20.30	-62.800

仿真过程中发现, LDMs 决策问题的所有功率流优化结果在 DigSilent 软件上都得到了有效验证。如图2所示为微电网1在 $t=1$ 时的静态结果图。

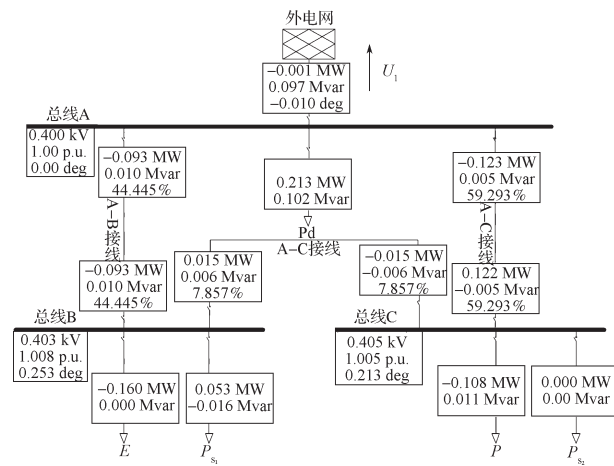
图2 $t=1$ 微电网1中交流负载流静态图Fig. 2 AC-load flow static diagram of microgrid 1 at $t=1$

图2中, 微电网功率流AB, BA, AC, CA对应的数据分别为-0.092, 0.093, -0.123, 0.124 MW。微电网1节点之间的优化功率流如表8所示, 而在表8中, AB, BA, AC, CA对应的数据分别为-88.90, 89.50, -125.28, 125.89 kW。将这两组功率流数据进行比较可知, 在仿真值与技术值之间, 数值非常接近, 表现出了非常令人满意的结果。

表8 微电网1节点之间的优化功率流

Table 8 Optimal power flows between microgrid 1 nodes

时间 / 15 min	P_{AB}/kW	P_{BA}/kW	P_{AC}/kW	P_{CA}/kW	P_{BC}/kW	P_{CB}/kW
0	-72.00	72.40	-107.90	108.40	7.10	-7.10
1	-88.90	89.50	-125.28	125.80	9.80	-9.80
2	-238.80	243.20	-83.30	83.30	47.50	-45.80
3	-46.80	47.00	-276.10	276.10	-38.60	38.80

6 结语

本研究中, 构建了一个将多层次结构体系连接到系统控制网络的智能电网, 多层次结构体系的上层决策层具有一组固定的参数(参考值)函数, 并

通过一个特定的控制策略结构来适应较低的决策水平, 根据这样的参数, 每个较低级别的决策者通过跟踪上层决策者所提供的参考值解决了自身的优化问题。

软件模拟仿真结果显示, 多层次结构体系得到了性能相差不太大而结构优于集中式的优化控制结构体系。此外, 多层次结构电网缩短了运行时间, 对电网能量进行了优化管理, 在现实生活中具有较高的实用价值和现实意义。

参考文献:

- [1] DELFINO F, MINCIARDI R, PAMPARARO F, et al. A Multilevel Approach for the Optimal Control of Distributed Energy Resources and Storage[J]. Transactions on Smart Grid, IEEE, 2014, 5(4): 2155-2162.
- [2] MINCIARDI R, ROBBA M. Bilevel Approach for the Optimal Control of Interconnected Microgrids[C]// Decision and Control (CDC), 2014 IEEE 53rd Annual Conference on. [S. l.]: IEEE, 2014: 2499-2504.
- [3] BERL A, NIEDERMEIER M, DE Meer H. Smart Grid Considerations: Energy Efficiency vs. Security[J]. Advances in Computers, 2013, 88: 159-198.
- [4] 赵洪山, 米增强, 牛东晓, 等. 利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 20-25.
ZHAO Hongshan, MI Zengqiang, NIU Dongxiao, et al. Power System Modelling Using Hybrid System Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 20-25.
- [5] BONFGLIO A, BRACCO S, BRIGNONE M, et al. A Receding-Horizon Approach for Active and Reactive Power Flows Optimization in Microgrids[C]//Control Applications (CCA), 2014 IEEE Conference on. [S. l.]: IEEE, 2014: 867-872.
- [6] 杨新法, 苏 剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on Micro-Grid Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [7] 刘梦璇. 微网能量管理与优化设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
LIU Mengxuan. Research on Energy Management and Optimal Design of Microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [8] 王瑞琪. 分布式发电与微网系统多目标优化设计与协调控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
WANG Ruiqi. Research on Multi-Objective Optimization Design and Coordinated Control of Distributed Generation and Microgrid[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [9] 张 学, 裴 玮, 邓 卫, 等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5553-5562.
ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. Energy Management and Coordinated Control Method for Multi-Source/Multi-Load DC Microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5553-5562.
- [10] 刘海璇, 吴福保, 董大兴, 等. 微电网能量管理系统中的公共信息模型扩展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 45-51.
LIU Haixuan, WU Fubao, DONG Daxin, et al. Extended Common Information Model for Microgrid Energy Management System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 45-51.
- [11] 王新刚, 艾 芊, 徐伟华, 等. 含分布式发电的微电网能量管理多目标优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 79-83.
WANG Xingang, AI Qian, XU Weihua, et al. Multi-Objective Optimal Energy Management of Microgrid with Distributed Generation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 79-83.

(责任编辑: 廖友媛)