

基于 Benders 分解的微电网联网运行优化

杨艳红^{1,2}, 裴 玮¹, 邓 卫¹, 肖 浩^{1,2}, 齐智平¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对联网运行的微电网, 对其优化潮流(OPF)问题进行扩展, 同时考虑机组组合(UC), 建立微电网优化运行模型。针对模型中含有大量混合 0/1 决策变量和连续运行变量的求解, 采用 Benders 分解方法将变量分离, 在无网络约束 UC 主问题和网络约束 OPF 子问题之间迭代求解。在改造后的 IEEE 13 节点系统上进行了算例分析, 表明所提方法可以快速可靠地优化微电网系统的运行。

关键词: 微电网; Benders 分解; 优化; 模型; 潮流; 机组组合

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.004

0 引言

随着电力系统负荷的不断增长, 单纯依靠增加装机容量来满足用电的需求会造成发电资源巨大的浪费, 而微电网作为智能电网的重要组成部分, 可以集成可再生能源发电、燃气轮机(GT)发电、储能装置以及部分电力负荷, 从中低压配电网接入电力系统, 运行方式灵活多样, 可以缓解电力系统中装机以及输电网架的建设压力, 其在未来电网中将发挥重要作用^[1-2]。如何合理地利用有限的资源, 提高微电网系统的运行效率, 力争达到系统的优化运行, 对于微电网的发展以及大规模应用具有重要意义。

由于微电网尽量保证能源的本地吸收利用没有输电环节, 其中的电源和负荷直接紧密耦合在一起, 负荷的波动直接反馈到电源, 同时光伏(PV)发电、风力发电等受到环境条件影响类型的电源输出功率随机波动, 这样就造成了部分机组的频繁启动和调整出力, 需要合理地安排机组的启停和出力配合。文献[3-6]研究了单母线微电网的经济运行问题, 分析了可再生能源波动、电价政策对于微电网运行的影响。文献[7-8]研究了微电网运行中发电成本最小、系统网损最小和环境影响费用最低等多个目标之间的协调优化, 采用多目标优化方法对微电网优化运行问题进行了研究。文献[9-11]研究了储能在微电网潮流优化中的作用, 表明储能可以很好地平抑可再生能源和公共连接点的能量波动, 但是在多母线的大系统中配置大量储能目前还不够现实, 系统较大的能量波动还需要机组之间的配合来解决。

上述研究都没有涉及微电网中多机组的协调配合运行问题, 目前针对小机组的机组组合 UC (Unit Commitment) 优化研究也相对较少。文献[12]使用场

景分析的方法研究了含有可再生能源和热电联供机组的机组组合优化问题, 无法保证系统全局最优。文献[13-14]分别使用动态规划和改进遗传算法对微电网机组组合优化进行了研究, 但都针对单母线微电网系统, 没有考虑系统网络拓扑约束。文献[15]对 3 种混合整数线性规划方法在机组组合问题上的应用进行了对比分析。文献[16-17]采用 Benders 分解方法对传统电力系统中的机组组合问题进行了求解, 但由于微电网中电源分散接入, 可再生能源发电输出功率不稳定, 使得系统潮流和机组的启停更为复杂。

针对目前对于多母线多机组联网微电网优化运行研究中的不足, 本文综合考虑了微电网运行优化中的机组组合问题和优化潮流 OPF (Optimal Power Flow) 问题, 建立了考虑机组组合的微电网优化运行模型。针对模型中十分庞大的变量和约束条件数目, 并且变量可以分为 0/1 决策变量和机组出力连续变量, 采用 Benders 分解的方法对 2 类变量进行分解, 形成无网络约束机组组合主问题和网络约束优化潮流子问题, 从而可以快速地对模型进行求解。在改造后的 IEEE 13 节点配电系统上进行了算例验证与仿真分析。

1 微电网优化运行问题

微电网中负荷随着时间、季节的变化而变化, 光伏、风电等不稳定电源输出功率也随着时间、季节的变化而变化, 负荷以及不稳定电源的这种变化使得若只改变机组的出力而不改变机组的组合, 不仅会造成资源的浪费, 而且可能难以满足负荷变化的要求, 甚至造成供电安全性、可靠性的问题。所以, 在进行微电网优化运行时, 需要将经典优化潮流进行扩展, 同时引入机组组合的考虑, 建立考虑机组组合的微电网优化运行模型。

经典优化潮流问题主要是对电力系统运行过程中的某个时间片段的静止计算分析, 需要详尽的网

络模型,一般没有考虑到发电机组的启停问题;而经典机组组合问题主要解决一个调度周期内各时间段机组的启停调度和机组出力,需要详尽考虑机组自身的特性,使得调度周期内发电成本最小,通常不考虑网络约束;文中以微电网综合运行成本最小为优化目标,建立兼顾微电网运行机组组合和优化潮流的数学优化模型如下。

目标函数:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^N [F_j v_{jt} + S_j y_{jt} + E_j (P_{jt}) + E_c (P_{et})] \quad (1)$$

约束条件如下。

a. 功率平衡约束。保证系统中每个节点的输入功率总和等于输出功率总和。由于微电网中电源与负荷之间的线路较短,线路损耗比较小,同时发电机组主要满足有功需求,暂时不考虑其无功调节能力,因此采用近似直流潮流的方法分析系统有功分配,建立功率平衡约束如下:对于非平衡节点的约束如式(2)所示,等号左边第 1 项为发电机组注入节点功率之和,第 2 项为与之相连线路注入功率之和,等号右边是负荷需求。

$$\sum_{j=1}^M P_{jk} + \sum_p \{B_{np}(\theta_{pt} - \theta_{nt}) - K_{np}[1 - \cos(\theta_{pt} - \theta_{nt})]\} = D_{nt} \quad (2)$$

b. 可靠性备用约束。为了保证系统突发应急的供电可靠性,系统运行时还需要留有一定备用容量,一般为负荷容量的 10%~20%,约束如下:

$$\sum_{j=1}^N P_j^{\max} v_{jt} \geq \sum_n D_{nt} + R_t \quad (3)$$

c. 发电机组输出功率约束。发电机组必须满足最小负荷率要求,也不能超过额定功率,约束关系如下:

$$P_j^{\min} v_{jt} \leq P_{jt} \leq P_j^{\max} v_{jt} \quad (4)$$

d. 传输功率约束。2 个节点之间传输的功率受到导线物理条件约束,不能超过最大输电能力,约束关系如下:

$$-C_{np} \leq B_{np}(\theta_{pt} - \theta_{nt}) \leq C_{np} \quad (5)$$

e. 微电网与外部电网接口功率约束。根据我国实际情况,目前联网运行的微电网不允许向电网卖电,其从电网吸收功率受到最大传输功率限制。

$$0 \leq P_{et} \leq P_{\max} \quad (6)$$

f. 机组运行状态约束:

$$y_{jt} \geq v_{jt} - v_{j,t-1} \quad (7)$$

g. 0/1 变量约束:

$$v_{jt}, y_{jt} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

其中, F_j 为机组 j 运行时的固定费用; S_j 为机组 j 启停费用; E_j 为机组 j 运行燃耗费用; E_c 为系统购电费用; v_{jt} 为机组 j 时段 t 运行状态变量; y_{jt} 为机组 j 时段 t 启停变量; P_{jt} 为机组 j 时段 t 有功功率; P_{et} 为系统时段 t 与大电网接口功率; B_{np} 为线路 $n-p$ 电纳; θ_{nt}

为节点 n 时段 t 电压相角; θ_{pt} 为节点 p 时段 t 电压相角; K_{np} 为线路 $n-p$ 损耗系数; D_{nt} 为节点 n 时段 t 负荷需求; R_t 为时段 t 系统备用容量; C_{np} 为线路 $n-p$ 传输容量限制; P_j^{\min} 、 P_j^{\max} 分别为机组 j 的最小和最大出力限制; P_{\max} 为系统与大电网接口功率限制; N 为机组数; T 为时段数; M_n 为节点 n 的机组个数; p 为与节点 n 相连接的节点。

式(1)~(8)所建立的微电网优化运行模型本质上是混合整数规划模型,模型中 0/1 决策变量个数较少,而与运行时间相关的连续运行变量数目很多,固定其中的 0/1 变量以后,余下的优化问题可以快速求解,因此考虑采用分解的方法求解这类复杂模型。

2 Benders 分解方法

Benders 分解方法是 J. F. Benders 在 1962 年首先提出的,目的是用于解决混合整数规划问题,即连续变量与整数变量同时出现的极值问题^[18]。Benders 分解广泛应用于带有决策变量和连续运行变量的混合规划问题,利用该问题中决策变量和连续运行变量的不同特点及相互关系,将其分解为决策主问题和运行子问题,并行迭代求解,按普通的优化问题求解方法(如原-对偶内点法)求解运行子问题后,将其解信息通过 Benders 割返回到主问题,再对主问题求解并判断是否达到最优化。应用问题不同, Benders 的分解形式也不同,其核心就是把一系列的子问题解,通过 Bender 割的形式返回到主问题,从而使子问题和主问题分开并行求解,此种方法已经在电力系统中有部分应用^[16-17]。

Benders 分解的基本原理如下,对于一个如下的混合规划问题 P:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} + f(\mathbf{y}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{F}(\mathbf{y}) \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0, \mathbf{y} \in \mathbf{S} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,变量 \mathbf{y} 是复杂变量,整个约束矩阵中都含有 \mathbf{y} ,当 \mathbf{y} 被固定后,变量 \mathbf{x} 的子集是完全独立的; \mathbf{A} 为系数矩阵; \mathbf{c} 、 \mathbf{b} 为系数向量; $f(\mathbf{y})$ 、 $\mathbf{F}(\mathbf{y})$ 为变量 \mathbf{y} 的函数; \mathbf{S} 为 \mathbf{y} 的可行集。

Benders 分解首先选择一个可行的变量 $\bar{\mathbf{y}}$,固定为 $\bar{\mathbf{y}}$,求解子问题 P1:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{b} - \mathbf{F}(\bar{\mathbf{y}}) \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

应用线性规划的对偶原理,求解 P1 问题的对偶问题 P2:

$$\begin{aligned} \max \quad & [\mathbf{b} - \mathbf{F}(\bar{\mathbf{y}})]^T \mathbf{u} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A}^T \mathbf{u} \leq \mathbf{c} \\ & \mathbf{u} \geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中, \mathbf{u} 为问题 P1 的对偶变量。

给定上界: $\mathbf{U}_B = [\mathbf{b} - F(\bar{\mathbf{y}})]^T \mathbf{u}_i + f(\bar{\mathbf{y}})$ 。

通过求解子问题 P2 后,原问题 P 便可以写成如下问题 P31:

$$\min \{ \max \{ [\mathbf{b} - F(\mathbf{y})]^T \mathbf{u} \mid \mathbf{A}^T \mathbf{u} \leq \mathbf{c}, \mathbf{u} \geq \mathbf{0} \} + f(\mathbf{y}), \mathbf{y} \in \mathbf{S} \} \quad (12)$$

再通过变换将 P31 写成如下极点形式的问题 P32:

$$\min \{ f(\mathbf{y}) + \max \{ [\mathbf{b} - F(\mathbf{y})]^T \mathbf{u}_i, i = 1, 2, \dots, m \}, \mathbf{y} \in \mathbf{S} \} \quad (13)$$

其中, $\mathbf{u}_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为对偶问题 P2 的 m 个极点。

引入任意一个新的变量 z , 上述主问题可以写成如下问题 P3:

$$\begin{aligned} \min z \\ \text{s.t. } z \geq f(\mathbf{y}) + [\mathbf{b} - F(\mathbf{y})]^T \mathbf{u}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \mathbf{y} \in \mathbf{S} \end{aligned} \quad (14)$$

给定下界: $\mathbf{L}_B = \min z$ 。

综上所述,应用 Benders 分解方法,将原始优化问题 P 分解为子问题 P2 和主问题 P3,通过反复迭代过程,修改系统的上、下限 \mathbf{U}_B 和 \mathbf{L}_B ,当 $\mathbf{U}_B = \mathbf{L}_B$ 时,得到最优解。

3 微电网优化运行问题的分解

应用 Benders 分解方法将复杂的微电网优化运行问题分解为主问题和子问题, Benders 主问题确定机组的启停调度,子问题求解网络的优化潮流,子问题向主问题传递某个确定启停状态在次优附近的余量信息,主问题根据此信息更新启停调度,反复迭代直到找到最优解。分解后主问题为 0/1 混合整数线性规划,子问题为非线性规划,子问题决定运行费用,同时考虑了传输限制和网络损耗。应用 Benders 分解方法求解微电网优化运行问题的基本原理如图 1 所示。

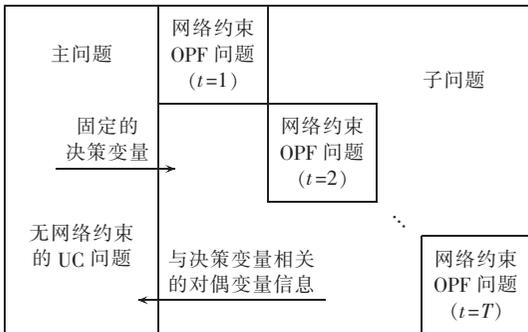


图 1 Benders 方法求解微电网优化运行问题的基本原理
Fig.1 Basic principle of microgrid operation optimization based on Benders decomposition

子问题和主问题的数学形式如下。

a. 子问题在第 w 次迭代时的模型如下。

目标函数:

$$z^{(w)} = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N [E_{ij}(P_{ji}) + E_e(P_{et})] \quad (15)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^{M_i} P_{jk} + \sum_p \{ B_{np}(\theta_{pt} - \theta_{nt}) - K_{np}[1 - \cos(\theta_{pt} - \theta_{nt})] \} = D_{nt} \quad (16)$$

$$P_j^{\min} v_{jt} \leq P_{jt} \leq P_j^{\max} v_{jt} \quad (17)$$

$$-C_{np} \leq B_{np}(\theta_{pt} - \theta_{nt}) \leq C_{np} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{et} \leq P_{e\max} \quad (19)$$

$$v_{jt} = V_{jt}^{(w-1)} : \lambda_{jt}^{(w)} \quad (20)$$

其中, $V_{jt}^{(w-1)}$ 为上一次主问题优化的结果; $\lambda_{jt}^{(w)}$ 为约束式(20)的对偶变量,提供给主问题进行第 w 次优化使用。

b. 主问题在第 w 次迭代时的模型如下。

目标函数:

$$\alpha^{(w)} + \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N (F_j v_{jt} + S_j y_{jt}) \quad (21)$$

约束条件:

$$\alpha^{(w)} \geq z^{(w)} + \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^N \lambda_{jt}^{(w)} (v_{jt} - V_{jt}^{(w)}) \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^N P_j^{\max} v_{jt} \geq \sum_n D_{nt} + R_t \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^N P_j^{\min} v_{jt} \leq \sum_n D_{nt} \quad (24)$$

$$y_{jt} \geq v_{jt} - v_{j,t-1} \quad (25)$$

$$v_{jt}, y_{jt} \in \{0, 1\} \quad (26)$$

式(22)为 Benders 割的形式,这些割提供了子问题中总体运行费用的一个较低估计,每次迭代增加一个割。式(23)和(24) 2 个约束称为可行割,强制主问题产生的解满足负载和备用容量的需求,从而保证子问题的可行性。并且,上述模型中只有 $\alpha^{(w)}$ 一个实数变量。

通过子问题与主问题间的循环迭代求解流程如图 2 所示。

综上所述,使用 Benders 分解的方法可以成功将微电网优化运行问题拆解成经典的机组组合问题和优化潮流问题,从而再分别进行求解,降低系统计算复杂度,能够快速收敛到系统最优值。

4 算例分析

算例选取经过改造后的 IEEE 13 节点^[19]配电系统进行优化分析,改造后的系统添加了 1 台索拉透平公司的 Saturn 20 型小型燃气轮机,额定功率输出 1210 kW;添加 3 台科勒公司的燃气内燃机,额定功率输出分别为 800 kW(GG1)、480 kW(GG2)、480 kW(GG3);在节点 634 加入 400 kW 装机容量的风力发

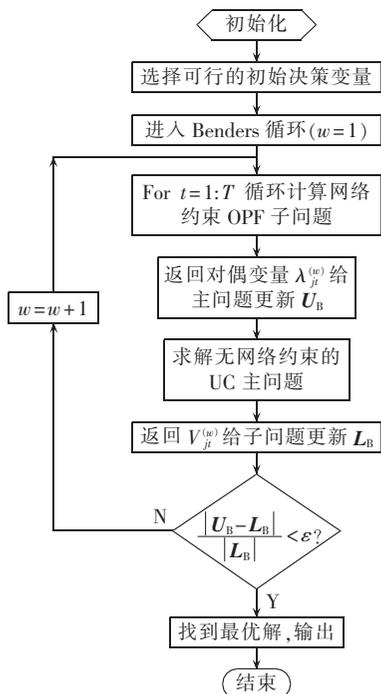


图 2 Benders 分解方法的求解流程图

Fig.2 Flowchart of microgrid operation optimization based on Benders decomposition

电机组(WT),在节点 675 接入 100 kW 装机容量的光伏发电。改造后的系统如图 3 所示,机组运行数据如表 1 所示,风力发电机组和光伏发电模拟功率输出如图 4 所示。标准 IEEE 13 节点配电系统为不平衡系统,本算例将其改造为平衡系统,线路参数取原来参数的正序分量,系统容量基准 1000 kV·A,电压基准 4.16 kV,系统有功和线路电抗分布见表 2,表中有功功率与电抗为标么值。

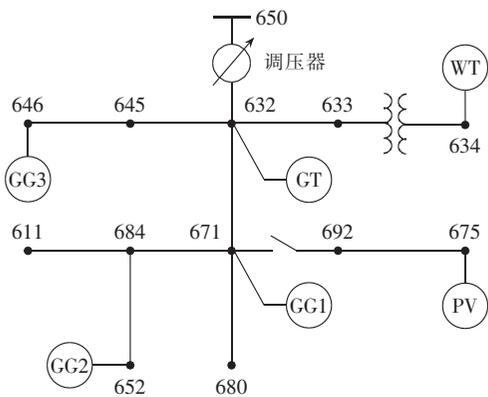


图 3 改造后的 IEEE 13 节点系统

Fig.3 Modified IEEE 13-bus system

表 1 机组运行数据

Table 1 Operational data of generator

机组	额定功率/kW	一次燃耗系数	开机费/(元·次 ⁻¹)
GT	1210	0.3902	110
GG1	800	0.2145	80
GG2	480	0.2268	45
GG3	480	0.2368	45

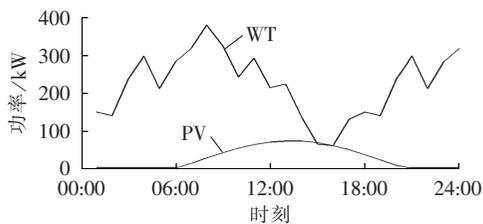


图 4 风力发电、光伏发电模拟输出

Fig.4 Simulative outputs of wind power and PV power

表 2 系统有功和线路电抗分布

Table 2 Distributions of system active power and transmission line reactance

节点	有功功率	支路	电抗
650	0	650-632	0.5036
632	0.200	632-645	0.0710
645	0.170	632-633	0.0727
633	0	632-671	0.2267
671	1.155	671-684	0.0433
684	0	671-692	0
692	0.170	633-634	0.6922
634	0.400	692-675	0.0398
675	0.843	671-680	0.1125
680	0	684-652	0.0260
652	0.128	684-611	0.0260
611	0.170	645-646	0.0433
646	0.230		

选取典型办公类负荷对上述系统运行时的机组组合和有功分配进行优化计算,系统总体日负荷曲线和不同节点日负荷空间分布情况如图 5、6 所示,系统白天峰值负荷大约是夜晚低谷负荷的 3~4 倍,

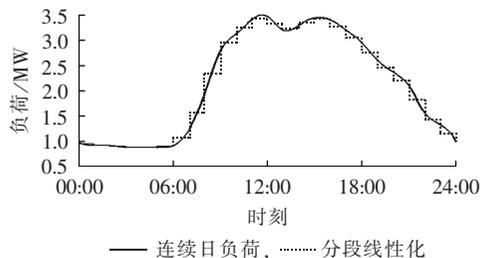


图 5 系统总体日负荷曲线

Fig.5 Overall daily load curve of system

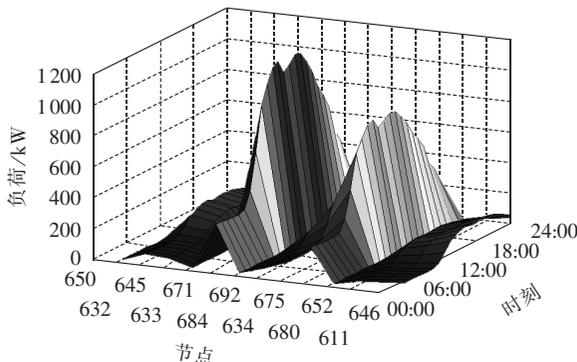


图 6 不同节点的日负荷空间分布

Fig.6 Spatial distribution of power load among different nodes

节点 671 和节点 675 的负荷水平明显高于其他节点,负荷总体呈现多峰多谷的空间分布。为了便于计算,对负荷进行了分段线性化处理。

为了计算分析系统运行时的经济特性,天然气价格取为 2.05 元/m³;微电网与外部电网接口电价取为峰-平-谷 3 段电价,分别为 1.2、0.8、0.4 元/(kW·h);微电网与外部电网接口交换功率最大为其峰值负荷的 20%。由于燃气轮机发电效率低,为了提高其运行经济性,文中考虑了其以热电联供方式运行,燃气轮机以发电调度为核心,不参与热能的平衡。因此,将其热效率折算到了发电成本考核当中,具体而言,燃气轮机余热回收效率取其发电效率的 2 倍,回收的热能价格取平均电价的 1/3,因此折算后的燃气轮机发电效率为其原始发电效率的 1.67 倍。

应用文中所述的 Benders 分解方法将机组状态变量、启停变量与连续运行变量进行分解,经过 2.4 s 10 次迭代计算,目标函数收敛到最优值,迭代过程如图 7 所示。系统运行优化结果为:日运行费用总计 3.448 万元,其中机组启停费用 0.042 万元,约占总费用的 1.22%;从电网买电费用 0.59 万元,约占总费用的 17.11%。如果系统按照常规方式运行,机组 GT 与 GG1 工作在额定功率或者关机状态,不足的功率通过启停 GG2、GG3 以及通过电网获得,此时的日运行费用总计需要 3.873 万元。优化后的与常规未优化的系统运行经济性对比如图 8 所示,通过优化节省了 11% 的运行费用。

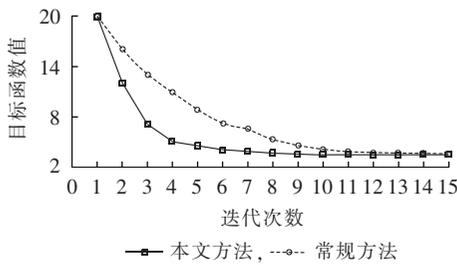


图 7 迭代收敛过程

Fig.7 Iterative convergence curves

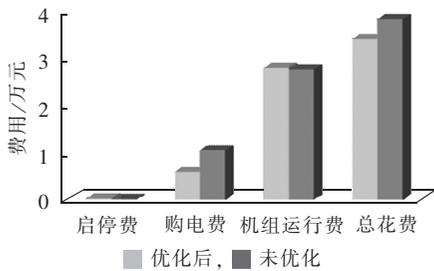


图 8 系统运行经济性对比

Fig.8 Comparison of system operating economy

如果采用常规的先分别进行机组组合优化和潮流优化,再进行滚动迭代,其中机组组合优化和潮流优化使用拉格朗日松弛方法,需要计算 6.2 s 14 次迭

代,最终系统运行费用的优化结果为 3.522 万元,其与本文所述方法的迭代收敛过程对比如图 7 所示。可见本文所提出的 Benders 分解方法收敛速度更快,优化结果也较好。

优化后的机组启停与出力情况如图 9 所示,其中大机组 GT、GG1 保持高负荷率运行,GT 只在白天高负荷时段运行,GG1 承担系统基荷;通过调节小机组的启停和从电网吸收的功率来平衡负荷的变化。由图中可以看出电价变化对于系统运行的影响,夜间低谷电价 0.4 元/(kW·h)要优于使用小机组 GG2、GG3 发电,优先使用外部电网的功率输入;在白天高峰电价,尽量避免从外部电网输入功率,但是由于午后风力发电输出功率骤降,所有机组都达到最大功率输出,仍然不够的部分由外部电网输入。

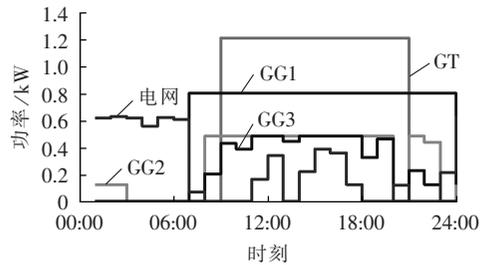


图 9 机组启停及出力优化结果

Fig.9 Results of unit startup/shutdown and power output optimization

为了检验系统运行状态是否满足要求,以系统峰值负荷($t=11$)为代表进行时间断面分析,检查系统各支路上的传输功率是否越限,此时系统的有功潮流分布如图 10 所示。

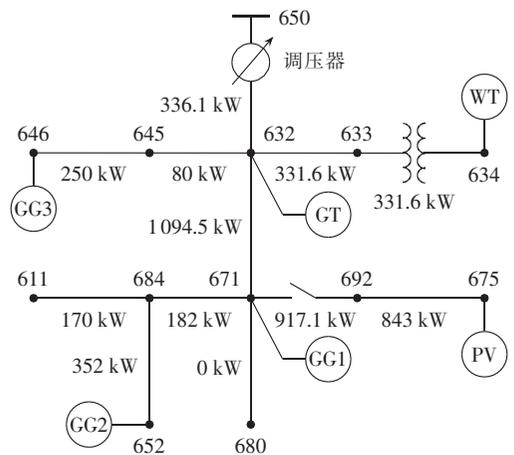


图 10 系统有功潮流分布

Fig.10 Distribution of system active power flow

由图 10 可见,支路 632-671、671-692、692-675 线路传输的功率较大,这是由于节点 671 和节点 675 的负荷水平较高,但没有超过线路传输功率的限制,系统峰值负荷运行时满足要求,其他时间断面也不会出现过负荷情况。

5 结论

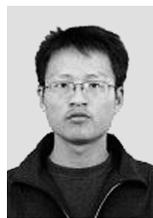
本文建立了考虑机组组合时微电网的优化运行模型,综合优化了系统中网络有功潮流分配和发电机组的启停配合。针对模型中含有大量的0/1决策变量和机组出力连续变量,研究了采用Benders分解的方法对模型进行求解。通过在改造后的IEEE 13节点系统上进行算例的计算与仿真分析,结果表明采用本文所述的优化方法可以显著提高微电网运行时的经济特性。

文中采用近似直流潮流的计算方法来分析系统有功分配和建立功率平衡约束,为了进一步精确优化微电网运行,下一步研究工作可以将文中的近似直流潮流部分改为采用交流潮流。

参考文献:

- [1] MARKVART T. Microgrids: power systems for the 21st century [J]. Refocus, 2006, 7(4): 44-48.
- [2] VENKATARAMANAN G, MARNAY C. A larger role for microgrids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 78-82.
- [3] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微电网网时的经济运行研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid [J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.
- [4] 张双乐, 李鹏, 陈超, 等. 基于改进变尺度混沌优化算法的微网优化运行 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 70-74.
ZHANG Shuangle, LI Peng, CHEN Chao, et al. Economic operation of microgrid based on improved mutative scale chaotic optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 70-74.
- [5] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [6] WU X, WANG X, BIE Z. Optimal generation scheduling of a microgrid [C] // 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe). Berlin, Germany: IEEE, 2012: 1-7.
- [7] MOHAMED F A, KOIVO H N. Multiobjective optimization using modified game theory for online management of microgrid [J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(1): 839-854.
- [8] 薛贵挺, 张焰, 刘玉娇, 等. 基于克隆选择算法的微电网多目标运行优化 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 16-21.
XUE Guiting, ZHANG Yan, LIU Yujiao, et al. Multi-objective operation optimization based on clone selection algorithm for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 16-21.
- [9] LEVRON Y, GUERRERO J M, BECK Y. Optimal power flow in microgrids with energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3226-3234.
- [10] LEVRON Y, SHMILOVITZ D. Optimal power management in fueled systems with finite storage capacity [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2010, 57(8): 2221-2231.
- [11] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [12] THAMMASORN C. Generation unit commitment in microgrid with renewable generators and CHP [C] // 2013 10th International Conference on Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Krabi, Thailand: IEEE, 2013: 1-6.
- [13] KANCHEV H, FRANCOIS B, LAZAROV V. Unit commitment by dynamic programming for microgrid operational planning optimization and emission reduction [C] // 2011 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP). Istanbul, Turkey: IEEE, 2011: 502-507.
- [14] LIANG H Z, GOOI H B. Unit commitment in microgrids by improved genetic algorithm [C] // IPEC, 2010 Conference Proceedings. Sapporo, Japan: IEEE, 2010: 842-847.
- [15] CARRION M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
- [16] MA H, SHAHIDEHPOUR S M. Security-constrained unit commitment with AC constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1538-1550.
- [17] MA Haili, SHAHIDEHPOUR S M. Transmission-constrained unit commitment based on Benders decomposition [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1998, 20(4): 287-294.
- [18] BENDERS J F. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems [J]. Numerische Mathematik, 1962, 4(1): 238-252.
- [19] IEEE 13 Node Test Feeder. IEEE PES distribution system analysis subcommittee [EB/OL]. [2013-08-10]. <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/feeder13.zip>.

作者简介:



杨艳红

杨艳红(1985—),男,河北承德人,博士研究生,主要从事微电网优化设计与运行控制方面的研究(E-mail: yangyanhong@mail.iese.ac.cn);

裴玮(1982—),男,江西抚州人,副研究员,博士,主要从事含分布式能源的电力系统分析、微电网运行控制和智能电网方面的研究;

邓卫(1983—),男,湖南永州人,助理研究员,博士,主要从事微电网稳定性分析、运行控制和信息化方面的研究。

微电网 CPS 物理端融合模型设计

刘汉宇^{1,2}, 邱 赞³, 牟龙华¹

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011;
3. 中船重工第 704 研究所, 上海 200031)

摘要: 基于微电网信息物理融合系统(CPS)的架构体系,分析了微电网 CPS 的信息资源环境特征,提出了针对微电网 CPS 中电气物理设备端节点的融合模型,其本质为一种依附于电气物理设备工作状态的微电网 CPS 云端计算融合模型;模型充分挖掘物理设备终端节点所被赋予的信息资源,各层次的任务有序地分配到核心服务器节点、集群服务器节点和物理设备端节点上,以达到所有信息资源高效利用的目的;为了满足能够在微电网“即插即用”控制策略下灵活调度和管理大量物理设备端节点的信息资源,提出一种新颖的环形协同管理机制,该机制能够有效地增加物理设备端节点的工作稳定性,减轻上层节点的计算负担;最后给出了具有参考意义的基于融合模型的设计方案。

关键词: 微电网; 信息物理融合系统; 代理; 融合模型; 电气设备; 物理端; 模型

中图分类号: TM 727

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.005

0 引言

微电网是为了解决分布式电源并网而出现的一个可控的小规模发电网络,其核心功能是规模化地接纳清洁能源。智能微电网(即微电网的智能化)是未来微电网的发展方向 and 新的组织形式^[1-3],能够实现微电网内电力流和信息流的高度融合统一。未来智能微电网应将先进的信息技术、控制技术与电力技术相结合,在满足不同用户对电能个性化需求的同时,实现清洁能源发电大规模平稳地接入主电网。在传统的电力系统建设中主要是集中在电力系统本身,并没有充分考虑到信息通信系统和电力系统的深入融合。这主要是因为当时的电力信息系统和电力系统还不需要具备足够深入的交互和控制^[4]。近年智能电网^[5]概念明确地指出未来电力系统发展方向中的信息化本质要求。显然,作为未来智能电网中

发挥绿色能源电力的重要环节,采用传统电力信息系统手段建设微电网已经不能满足未来智能化发展的需要。

信息物理融合系统 CPS(Cyber Physical System)^[6]将计算能力、通信能力和自治控制能力进行兼容和深度整合,通过信息系统和物理系统的深度交互融合而形成的一个全新的研究领域,是基于下一代高速无线网络和嵌入式系统等技术而发展起来的智能系统。CPS 使得物理设备成为具有强大网络信息能力和自主能力的智能行为体,如同一个能够实时获知环境信息而执行指定任务的联网机器人,同时这些“机器人”的行为是依赖于物理设备本身性质来体现。

文献[7-8]提出将 CPS 概念引入电力系统中,分析了 CPS 与智能电网在概念上的相通之处,提出了以电力 CPS 完成智能电网建设的想法。但若一开始就以整个庞大的电力系统作为研究对象,范围将会过大,研究比较笼统,技术上难以细化和深入。另一方面,目前对智能电网的定义和内涵都不完善,其中的一些体系和关键技术都存在着争议,直接以还处

收稿日期:2014-02-10;修回日期:2014-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207110)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207110)

Optimal operation of grid-connected microgrid based on Benders decomposition

YANG Yanhong^{1,2}, PEI Wei¹, DENG Wei¹, XIAO Hao^{1,2}, QI Zhiping¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The optimal power flow problem is extended for the grid-connected microgrid and an optimal operation model with the consideration of UC(Unit Commitment) is built. The 0/1 decision variables and the continuous operational variables mixed in the model are separated by the Benders decomposition and solved by the iteration between the UC main problem without network constraints and the OPF sub-problem with network constraints. Case analysis of the modified IEEE 13-bus system verifies that the proposed method can quickly and reliably optimize the operation of microgrid.

Key words: microgrid; Benders decomposition; optimization; models; power flow; unit commitment