

计及孤岛约束的微网经济优化

王 辉

(国网盐城供电公司电力调度控制中心,江苏 盐城 224005)

摘要: 提出一种计及孤岛条件约束的微网经济调度模型,并网运行时作为主问题,以微网系统的运行成本最小为目标;孤岛运行时作为子问题,以孤岛期间微网内电源与负荷不匹配度最小为目标,通过电源割集1和负荷割集2联系主问题与子问题,不断修正割集使模型达到经济最优。针对模型中复杂的目标函数及约束条件,利用线性化技术,来加快求解速度,一系列算例说明了所提模型的正确性。

关键词: 微网;并网运行;孤岛运行;储能;线性化

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)05-0057-06

能源危机、环境污染及大规模互联带来的连锁故障等问题,使传统大电网经济调度运行陷入困境^[1]。微网的出现为电网提供了新的发展方向。微网的规模一般较小,有并网和孤岛两种运行工况,且能在2种模式间平滑切换^[2,3]。

自从 Lasseter R 教授提出微网概念后,得到世界各国电力专家学者们的普遍认同,随后对微网的各个领域展开了研究。文献[4-5]对微网孤岛时的基于储能容量约束、频率波动约束以及可靠性约束的经济调度问题展开了研究。文献[6-9]研究了微网并网时的经济运行问题,有静态的经济调度也有动态的经济调度,有单一电负荷的经济调度,也有热电联供的经济调度。上述微网研究不能有效地实现并网与孤岛之间的统一,研究者没有站在并网与孤岛是一整体的高度对微网内的机组出力作出规划。微电网经济调度的时间尺度一般较短,通常给出的是日前一天24h的调度计划,而由于微网中不可控电源出力的随机性,微网经济调度应尽可能地给出实时调度信息,这样对计算速度就有一定的要求,通常可控电源的发电成本(包括燃料成本和启、停成本等)是一非凸不可微的函数,因此微网经济调度就为一混合整数非线性规划(MINLP)模型,直接求解势必付出较长的时间代价。文中采用文献[10,11]中的方法对模型中的目标函数和约束全部进行线性化,以加快计算速度,文献[11]虽然对微网经济调度模型进行了线性化,但其成本考虑的比较简单,算例中只有2个可控电源,这样很难体现线性化后模型计算速度的加快,文献[12]没有考虑机组启停成本(虽然文献中目标函数包含启停成本符号),储能也作了尽可能简单的处理。

1 微网优化模型

基于上述文献的不足,文中提出一种新的思路,计

及孤岛约束的微网经济调度模型^[12],可以在调度周期内微网任意连续 t h孤岛的情况,针对模型中复杂的成本和约束,采用线性化技术以加快求解速度。

1.1 并网优化模型

并网时的优化目标是使微网系统运行成本最低,并网优化目标函数可以表示为:

$$\text{Min} \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} (Cf_{i,t} + Cu_{i,t} + Cd_{i,t} + Com_{i,t}) + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} Com_{i,j} + \sum_{t \in T} Ce_t \quad (1)$$

式中: T 为优化周期; I 为可控微源数量; J 为不可控微源数目; $Cf_{i,t}$ 为可控微源 i 在时段 t 内的燃料成本; $Cu_{i,t}$ 为可控微源 i 在时段 t 的启动成本; $Cd_{i,t}$ 为可控微源 i 在时段 t 的停机成本; $Com_{i,t}$ 为可控微源 i 在时段 t 内的运行维护成本; $Com_{i,j}$ 为不可控微源 j 在时段 t 内的运行维护成本; Ce_t 为微网在时段 t 内与主网交互成本。可控微源的成本一般用二次多项式表示:

$$Cf_{i,t} = a_i + b_i P_{i,t} + c_i P_{i,t}^2 \quad (2)$$

式中: a_i, b_i, c_i 为可控微源的成本系数。可控微源的启动成本可表示为:

$$Cu_{i,t} = \{\alpha_i + \beta_i [1 - \exp(-X_{i,t}^{\text{off}})/\tau_i]\} I_{i,t} (1 - I_{i,t-1}) \quad (3)$$

式中: α_i, β_i 为可控微源的启动成本系数; $X_{i,t}^{\text{off}}$ 为可控微源 i 到时刻 t 以连续停机的时间; τ_i 时间常数; $I_{i,t}$ 为0,1启停变量,可控微源 i 时刻 t 开启为1,否则为0;可控微源的启动成本可表示为:

$$Cd_{i,t} = C_i (I_{i,t-1} - I_{i,t}) \quad (4)$$

式中: C_i 为可控微源 i 停机成本,文中为一常数;式(4)若右边的值小于零,则 $Cd_{i,t}$ 取0。

可控微源的运行维护成本可以表示为:

$$Com_{i,t} = k_i P_{i,t} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (5)$$

式中: k_i 为运行维护成本系数;对不可控的微源有类似

地公式。与主网交互的成本可以表示为:

$$C_{e_t} = \rho_t PM(t) \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中: ρ_t 为电价; $PM(t)$ 为 t 时刻主网与微网交互的功率, 微网向主网输送功率为正, 反之为负。

并网优化模型的约束包括传统机组的一些约束, 还有微网分布式电源自身的一些特性约束。

功率平衡约束:

$$\sum_i P_{i,t} + \sum_j P_{j,t} + PM(t) = \sum_d D_{d,t} \quad \forall t \quad (7)$$

式中: $P_{i,t}$ 已包含了储能系统 (Energy Storage System, ESS) 的功率, 具体公式为:

$$P_t^{\text{ESS}} = P_t^{\text{dis}} \eta_{\text{dis}} - P_t^{\text{ch}} / \eta_{\text{ch}} \quad \forall t \quad (8)$$

式中: P_t^{ch} , P_t^{dis} 为 ESS 的充 / 放电功率; η_{ch} , η_{dis} 为 ESS 的充 / 放电效率; d 为负荷的种类数; $D_{d,t}$ 为负荷需求。

微网与主网交互功率约束:

$$-P^{\text{ex,max}} \leq P_t^{\text{ex}} \leq P^{\text{ex,max}} \quad \forall t \quad (9)$$

式中: $P^{\text{ex,max}}$ 为主网与微网交互的最大功率。

可控微源的出力上下限约束:

$$P_i^{\text{min}} I_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\text{max}} I_{i,t} \quad \forall i \in I, \forall t \quad (10)$$

式中: P_i^{max} , P_i^{min} 分别为微源出力的上下限。

微源爬坡约束:

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq UR_i \quad \forall i \in I, \forall t \quad (11)$$

$$P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq DR_i \quad \forall i \in I, \forall t \quad (12)$$

式中: UR_i , DR_i 分别为上爬坡率和下爬坡率。

最小开停机约束:

$$(T_{i,t-1}^{\text{on}} - UT_i)(I_{i,t-1} - I_{i,t}) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \quad (13)$$

$$(T_{i,t-1}^{\text{off}} - DT_i)(I_{i,t-1} - I_{i,t}) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall t \quad (14)$$

式中: $T_{i,t-1}^{\text{on}}$, $T_{i,t-1}^{\text{off}}$ 分别为微源 i 到时刻 $t-1$ 时已连续开机和关机的时间; UT_i , DT_i 分别为微源 i 最小开机时间和最小关机时间。

ESS 约束条件:

$$SOC_t = SOC_{t-1} + P_t^{\text{ESS}} \Delta t / Cap \quad (15)$$

$$0 \leq P_t^{\text{ch}} \leq P^{\text{ch,max}} u_t, 0 \leq P_t^{\text{dis}} \leq P^{\text{dis,max}} v_t \quad (16)$$

$$SOC^{\text{min}} \leq SOC_t \leq SOC^{\text{max}} \quad (17)$$

$$u_t + v_t \leq 1, u_t, v_t \in \{0, 1\} \quad (18)$$

$$(T_{t-1}^{\text{ch}} - MC)(u_{t-1} - u_t) \geq 0 \quad \forall t \quad (19)$$

$$(T_{t-1}^{\text{dis}} - MD)(v_{t-1} - v_t) \geq 0 \quad \forall t \quad (20)$$

式(15)为荷电状态(SOC)约束; Cap 为 ESS 的额定容量; 式(16)为 ESS 最大充电功率和最大放电约束; 式(17)为 SOC 上下限约束; 式(18)为充 / 放电特性互斥

约束, u, v 为 0, 1 变量; 式(19)和式(20)为蓄电池最小充 / 放电时间约束, T_{t-1}^{ch} , T_{t-1}^{dis} 分别为 ESS 到时刻 $t-1$ 已连续充 / 放电的时间, MC, MD 分别为 ESS 的最小充 / 放电时间。

负荷约束:

$$\sum_{t \in [t_0, t_f]} D_{d,t} = E_d \quad \forall d \in D, \forall t \quad (21)$$

$$(T_{d,t-1}^{\text{on}} - MU_d)(z_{d,t-1} - z_{d,t}) \geq 0 \quad \forall d \in D, \forall t \quad (22)$$

$$D_{d,t}^{\text{min}} z_{d,t} \leq D_{d,t} \leq D_{d,t}^{\text{max}} z_{d,t} \quad \forall d \in D, \forall t \quad (23)$$

式(21)表示 d 类负荷在时段 $[t_0, t_f]$ 必须消耗的能量;

式(22)表示负荷最小开启时间约束, $T_{d,t-1}^{\text{on}}$ 表示到时刻 $t-1$ 负荷 d 已连续开启的时间; MU_d 为负荷 d 最小开启时间; $z_{d,t}$ 为 0, 1 变量, 负荷开启为 1 反之为 0。

1.2 孤岛优化模型

孤岛时的优化目标是使任意时刻孤岛时, 微网的不匹配功率最小, 孤岛优化目标函数可以表示为:

$$\text{Min } w_s = \sum_t (SL_{1,t}^s + SL_{2,t}^s) \quad (24)$$

式中: SL_1, SL_2 为松弛变量; t 为孤岛的时段数; s 为场景指标。孤岛在场景 s 下的约束, 参照并网时的约束。

场景 s 下的功率平衡:

$$\sum_i P_{i,t}^s + \sum_j P_{j,t}^s + P_t^{\text{ex},s} + SL_{1,t}^s - SL_{2,t}^s = \sum_d D_{d,t}^s \quad \forall t \quad (25)$$

式中: 加 s 的变量均为场景 s 下的变量; 为了保证功率时刻平衡, 对其进行松弛, 松弛变量的物理意义为 SL_1, SL_2 分别表示虚拟发电机和虚拟负荷。

固定整数约束:

$$I_{i,t}^s = I_{i,t} : \lambda_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \quad (26)$$

$$u_t^s = u_t : \mu_t^{\text{dis},s} \quad \forall t \quad (27)$$

$$v_t^s = v_t : \mu_t^{\text{ch},s} \quad \forall t \quad (28)$$

$$z_{d,t}^s = z_{d,t} : \pi_{d,t}^{\text{ch},s} \quad \forall d \in D, \forall t \quad (29)$$

场景 s 下的微网与主网交互功率约束:

$$-P^{\text{ex,max}} \leq P_t^{\text{ex},s} \leq P^{\text{ex,max}} \quad \forall t \quad (30)$$

场景 s 下可控微源的出力上下限约束:

$$P_i^{\text{min}} I_{i,t}^s \leq P_{i,t}^s \leq P_i^{\text{max}} I_{i,t}^s \quad \forall i \in I, \forall t \quad (31)$$

场景 s 下微源爬坡约束:

$$P_{i,t}^s - P_{i,t-1}^s \leq UR_i \quad \forall i \in I, \forall t \quad (32)$$

$$P_{i,t-1}^s - P_{i,t}^s \leq DR_i \quad \forall i \in I, \forall t \quad (33)$$

场景 s ESS 约束条件:

$$SOC_t^s = SOC_{t-1}^s + P_t^{\text{ESS},s} \Delta t / Cap \quad (34)$$

$$0 \leq P_i^{\text{ch},s} \leq P_i^{\text{ch},\max} u_i^s, 0 \leq P_i^{\text{dis},s} \leq P_i^{\text{dis},\max} v_i^s \quad (35)$$

$$SOC^{\min} \leq SOC_i^s \leq SOC^{\max} \quad (36)$$

场景 s 负荷约束:

$$\sum_{t \in [t_0, t_f]} D_{d,t}^s = E_d \quad \forall d \in D, \forall t \quad (37)$$

$$D_{d,t}^{\min,s} z_{d,t}^s \leq D_{d,t}^s \leq D_{d,t}^{\max,s} z_{d,t}^s \quad \forall d \in D, \forall t \quad (38)$$

式(1—38)为文中提出的优化模型,计算步骤:(1) 优化并网模型(1—23),得到微网的启停计划(0,1);(2) 将(1)中的启停计划传入孤岛优化模型中,若孤岛优化模型的目标函数大于0,加入割集1到主问题:

$$w_s + \sum_t \sum_{i \in I} \lambda_{i,t}^s (I_{i,t} - I_{i,t}^s) + \sum_t \mu_t^{\text{ch},s} (v_t - v_t^s) + \sum_t \mu_t^{\text{dis},s} (u_t - u_t^s) \leq 0 \quad (39)$$

若迭代数次后, w_s 始终不能为0,说明仅调微源已不能满足要求,此时需要加入对负荷的调节,加入割集2到主问题中重新进行优化:

$$w_s + \sum_t \sum_{i \in I} \lambda_{i,t}^s (I_{i,t} - I_{i,t}^s) + \sum_t \mu_t^{\text{ch},s} (v_t - v_t^s) + \sum_t \mu_t^{\text{dis},s} (u_t - u_t^s) + \sum_t \sum_{d \in D} \pi_{d,t}^s (z_{d,t} - z_{d,t}^s) \leq 0 \quad (40)$$

若对上述模型直接优化,由于存在大量的0,1变量、复杂的成本函数(例如启停成本)及复杂的约束(例如微源的最小启停时间约束),计算难度较大、计算速度较慢,鉴于此,采用[14]中的线性化技术对模型中的目标函数和约束条件全部进行线性化,以降低求解难度加快求解速度。

2 模型线性化

2.1 目标函数线性化

燃料成本线性化。将燃料成本二次函数分段线性化,有:

$$Cf_{i,t} = \sum_{l=1}^{NL} F_i^l \delta_{i,t}^l \quad \forall t \quad (41)$$

$$T_{l,i} = P_{i,\min} + (P_{i,\max} - P_{i,\min})l/NL \quad l \in [1, NL] \quad (42)$$

$$F_i^l = [Cf_{i,t}(T_{j,l}) - Cf_{i,t}(T_{j,l-1})] / (T_{j,l} - T_{j,l-1}) \quad (43)$$

$$P_{i,t} = \sum_{l=1}^{NL} \delta_{i,t}^l + P_{\min} I_{i,t} \quad \forall t \quad (44)$$

$$(T_{1,i} - P_{i,\min})m_{i,t}^1 \leq \delta_{i,t}^1 \quad (45)$$

$$(T_{l,i} - T_{l-1,i})m_{i,t}^l \leq \delta_{i,t}^l \quad l=2, \dots, NL-1 \quad (46)$$

$$\delta_{i,t}^l \leq (T_{l,i} - T_{l-1,i})m_{i,t}^{l-1} \quad l=2, \dots, NL-1 \quad (47)$$

$$\delta_{i,t}^{NL} \leq (P_{\max,i} - T_{NL-1,i})m_{i,t}^{NL-1} \quad (48)$$

其中,式(41)中 F_i^l 为第 l 段线性化的斜率; $\delta_{i,t}^l$ 为第 l 段内微源 i 在时刻 t 输出的功率;式(42)为每段功率, NL 为分段数;式(43)为每段斜率计算式;式(44)将微源 i 在时刻 t 输出的功率线性化;式(45—48)对每段功率的约束, $m_{i,t}^l$ 为0,1变量,当微源 i 在时刻 t 输出超出第 l 段的范围时,取0;反之取1。

启动成本的线性化。启动成本是一个与停机时间有关的指数函数:

$$Cu_{i,t} = \sum_{l=1}^{ND} K_i^l \omega_{i,t}^l \quad \forall t \quad (49)$$

$$\sum_{l=1}^{ND} \omega_{i,t}^l = y_{i,t} \quad \forall t \quad (50)$$

$$s_{i,t-1} = \sum_{l=1}^{ND-1} l \omega_{i,t}^l + \theta_{i,t} \quad \forall t \quad (51)$$

$$ND \omega_{i,t}^{ND} \leq \theta_{i,t} \leq \gamma_i (\omega_{i,t}^{ND} - \gamma_{i,t} + 1) \quad \forall t \quad (52)$$

式(49)是对启动成本的线性化, ND 为分割的段数; K_i^l 为第 l 段的启动成本系数; $\omega_{i,t}^l$ 为0,1变量,当微源 i 在时刻 t 启动且已停机 l 小时取值1,反之取0;式(50)中: $y_{i,t}$ 为0,1变量,当微源 i 在时刻 t 启动时取1,式(50)是为了保证在所有段只有一个变量取1;式(51) $s_{i,t}$ 是用来记录到时刻 t 已连续停机的小时,若 $I_{i,t}=0$,则 $s_{i,t} = s_{i,t-1} + 1$;否则 $s_{i,t} = 0$; $\theta_{i,t}$ 为一虚拟变量;式(52)对 $\theta_{i,t}$ 进行约束, $\gamma_{i,t}$ 为一罚值,取一足够大的正整数(如取24),应注意若微源 i 在 ND 小时甚至更长的时间内都没有开机,式(52)主要处理这种情况。

2.2 约束条件线性化

最小开停机时间约束线性化。针对约束(12)和(13),采用文献[14]中的方法对其线性化。最小开机时间约束:

$$\sum_{t=1}^{L_i} (1 - I_{i,t}) = 0 \quad (53)$$

$$\sum_{r=t}^{t+UT_i-1} I_{i,r} \geq UT_i y_{i,t} \quad \forall t = L_i + 1, \dots, T - UT_i + 1 \quad (54)$$

$$\sum_{r=t}^T (I_{i,r} - \gamma_{i,t}) \geq 0 \quad \forall t = T - UT_i + 2, \dots, T \quad (55)$$

式(53—55)为最小开机时间约束线性化,其中 $L_i = \min\{T, (UT_i - U_{i,0})I_{i,0}\}$,如果 $L_i < 1$,则剔除约束(53);若 $L_i + 1 > T - UT_i + 1$,去掉(54);若 $UT_i < 2$,则去掉约束(55)。

最小停机约束:

$$\sum_{t=1}^J I_{i,t} = 0 \quad (56)$$

$$\sum_{r=t}^{t+DT_i-1} (1 - I_{i,r}) \geq DT_i x_{i,t} \quad \forall t = J + 1, \dots, T - DT_i + 1 \quad (57)$$

$$\sum_{r=t}^T (1 - I_{i,r} - x_{i,t}) \geq 0 \quad \forall t = T - DT_i + 2, \dots, T \quad (58)$$

式(56—58)为最小停机时间约束线性化,其中 $J_i = \min\{T, (DT_i - U_{i,0})(1 - I_{i,0})\}$; $x_{i,t}$ 为0,1 变量,当微源 i 在时刻 t 关闭时取1,否则取0。

储能的最小充/放电线性化约束:

$$\sum_{r=t}^{t+MC-1} u_r \geqslant MCg_t \quad \forall t = 1, \dots, T - MC + 1 \quad (59)$$

$$\sum_{r=t}^T (u_r - g_r) \geqslant 0 \quad \forall t = T - MC + 2, \dots, T \quad (60)$$

$$\sum_{r=t}^{t+MD-1} (1 - v_r) \geqslant MDh_t \quad \forall t = 1, \dots, T - DT_i + 1 \quad (61)$$

$$\sum_{r=t}^T (1 - v_r - h_r) \geqslant 0 \quad \forall t = T - MD + 2, \dots, T \quad (62)$$

式(59)和(60)为最小充电时间约束线性化, g_t 当储能在时刻 t 开始充电时取1,否则取0。式(61)和(62)为最小放电时间约束线性化, h_t 当储能在时刻 t 开始放电时取1,否则取0。

负荷最小运行时间线性化约束:

$$\sum_{r=t}^{t+MU_d-1} z_{i,r} \geqslant MU_d q_{d,t} \quad \forall t = 1, \dots, T - MU_d + 1 \quad (63)$$

$$\sum_{r=t}^T (z_{i,r} - q_{d,t}) \geqslant 0 \quad \forall t = T - MU_d + 2, \dots, T \quad (64)$$

式(63—64)为负荷最小运行时间约束线性化, $q_{d,t}$ 当负荷 d 在时刻 t 开启运行时取1,否则取0。具体经济优化调度模型如图1所示。

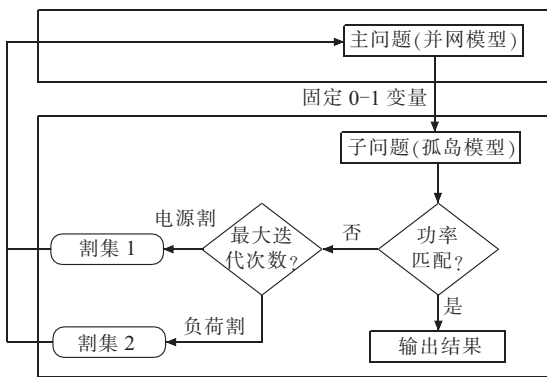


图1 微网经济调度优化模型

3 算例分析

文中微网包含4个可控的微源,2个不可控的微源,5个可调负荷,一个储能装置以及若干固定负荷。采用CPLEX进行求解,燃料成本线性化为3段,启动成本线性化为6段,优化周期为24h,取时间间隔1h。机组、储能、可调负荷特性参数见表1—3,实时电价见图2,固定负荷需求、启动成本线性化系数及不可控微源出力分别见表4—6。算例1为并网时微网经济运行调度;算例2为任意1h孤岛时的微网经济运行。

表1 机组特性参数

DG	类型	a/ (\$·MW ⁻¹)	b/ (\$·MW ⁻¹)	c/ (\$·MW ⁻¹)	P _{max} / /MW	P _{min} / /MW
1	D	10	6	0.001 0	6.0	1.0
2	D	20	8	0.002 5	5.0	1.0
3	D	30	10	0.002 5	4.0	0.8
4	D	40	15	0.001 2	3.0	0.8
5	N	0	0	0	1.0	0
6	N	0	0	0	1.5	0

DG	UR/ (MW·h ⁻¹)	DR/ (MW·h ⁻¹)	SC/\$	UT/h	DT/h	初始状态/h
1	2.5	2.5	30	3	3	-3
2	2.5	2.5	25	3	3	-3
3	3.0	3.0	30	2	2	-2
4	3.0	3.0	25	2	2	-2

注:DG表示分布式电源;D表示可控微源;N表示不可控微源。

表2 储能特性参数

Cap/ (MW·h)	P _{ch} ^{max} / /MW	P _{ch} ^{min} / /MW	P _{dis} ^{max} / /MW	P _{dis} ^{min} / /MW	MC/h
10	2	0.4	2	0.4	5

MD/h	SOC(0)	η _{ch}	η _{dis}	SOC ^{max}	SOC ^{min}
5	0.5	0.85	0.9	0.2	0.9

表3 可调负荷特性参数

负荷	最大值/ /MW	最小值/ /MW	能量/ (MW·h)	起止时 刻/h	MU/h
1	0.4	0	1.6	11-15	1
2	0.4	0	1.6	15-19	1
3	0.8	0.02	2.4	16-18	1
4	0.8	0.02	2.4	14-22	1
5	2.0	1.8	47	1-24	24

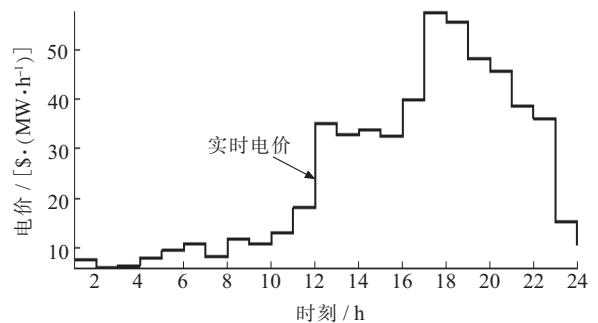


图2 实时电价

表4 微网中固定负荷

时刻/h	负荷/MW	时刻/h	负荷/MW	时刻/h	负荷/MW
1	8.73	9	11.19	17	16.13
2	8.54	10	11.78	18	16.14
3	8.47	11	12.08	19	15.56
4	9.03	12	12.13	20	15.51
5	8.79	13	13.92	21	14.00
6	8.81	14	15.27	22	13.03
7	10.12	15	15.36	23	9.820
8	10.93	16	15.69	24	9.450

表 5 启动成本线性化系数

DG	1	2	3	4	5	6
1	6.330	12.99	18.33	22.33	24.99	25.65
2	6.670	13.33	18.67	22.67	25.33	26.67
3	13.30	18.67	22.67	25.33	26.67	27.33
4	18.67	22.67	25.33	26.67	27.33	27.67

表 6 不可控微源出力

时刻/h	DG5/MW	DG6/MW	时刻/h	DG5/MW	DG6/MW
1	0.00	0.00	13	0.40	0.81
2	0.00	0.00	14	0.37	1.20
3	0.00	0.00	15	0.00	1.23
4	0.00	0.00	16	0.00	1.28
5	0.63	0.00	17	0.05	1.00
6	0.80	0.00	18	0.04	0.78
7	0.62	0.00	19	0.00	0.71
8	0.71	0.00	20	0.00	0.92
9	0.68	0.00	21	0.57	0.00
10	0.35	0.00	22	0.60	0.00
11	0.62	0.00	23	0.00	0.00
12	0.36	0.75	24	0.00	0.00

算例 1 的 DG(包括储能的充 / 放电情况)的启停情况见表 7。

表 7 算例 1DG 启停计划

DG	时刻 / h											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
充电	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
放电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DG	时刻 / h											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
充电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
放电	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0

从表中可以看出, DG1、DG2 全开, DG3 和 DG4 前 10 h 关机, 是由 DG 的发电成本和实时电价共同决定的。储能在 17~21 h 放电, 对照图 4 和表 7, 2~6 h 时电价最低, 储能在充电; 16~20 h 时的电价最高, 储能在放电。这就充分利用储能“低储高发”特性, 降低微电网运行成本, 也是符合实际情况的。算例 1 的运行成本为 3 557.405 \$, 表 8 为算例 1 可调负荷的情况。

算例 2 考虑任一小时孤岛时的微网经济运行情况, 共有 24 h 也即 24 种场景, 任一场景发生时, 微网最终经济运行方案都应予满足。孤岛发生的时间内, 微

表 8 算例 1 可调负荷的计划

DG	时刻 / h											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

DG	时刻 / h											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

网与主网交互的功率应为 0, 且算例 2 中不允许切负荷, 只通过调整微源的启停来满足所有的场景。表 9 为算例 2 中微源的最终出力计划。

表 9 算例 2DG 启停计划

DG	时刻 / h											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
充电	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
放电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

DG	时刻 / h											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
充电	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
放电	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0

为了与算例 1 的微源启停计划相比较, 对表 9 中变化的部分加黑, 从表 9 中可以看出, DG3 的 3~9 h 由 0 变成 1, 储能的充 / 放电时刻基本没变。算例 2 只加两次割 1(即约束(39)), 所有场景就全部满足。表 10 给出每次调整的机组对偶乘子 λ , 从 λ 值中可以清晰地看出微源的调整过程。

表 10 对偶变量乘子 λ

DG	第一次调整				第二次调整			
	4 h	7 h	8 h	9 h	1 h	2 h	3 h	4 h
1	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
2	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-2.5
3	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
4	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

从表中可以看出, 第一次调整在 4 h, 7 h, 8 h, 9 h,

10 h 孤岛时,子问题不为零,此时需要加割 1,返回主问题进行重新决策;第二次调整在时刻 1 h、2 h、3 h、4 h 孤岛时,子问题 w_s 不为零,此时需要加割 1 返回主问题再一次重新决策。算例 2 的运行成本为 3 739.281 \$,相对于算例 1,算例 2 的成本增加了 181.876 \$,这也符合实际情况,1 h 孤岛时开启的微源数目肯定会有所增加。图 3 为算例 1 和算例 2 微网与主网的交互功率,图 4 为算例 1 与算例 2 中 ESS 的充/放电功率比较,充电为正,放电为负。

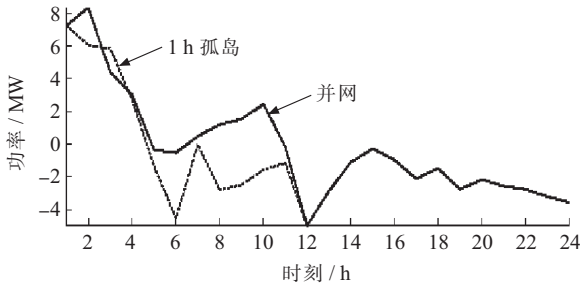


图 3 算例 1 和算例 2 与主网交互功率

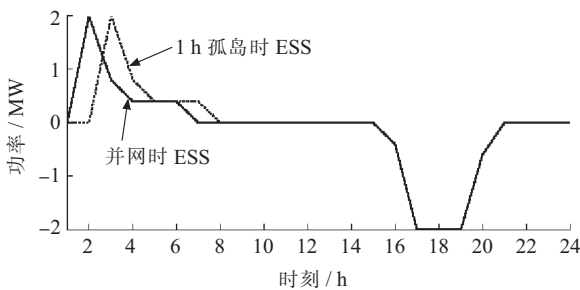


图 4 算例 1 和算例 2 储能充/放电功率

4 结束语

文中提出了一种含孤岛约束的微网优化模型,避免了以往只单独考虑并网或孤岛优化的缺点,但该微网并网、孤岛统一模型是一种优化层面的统一,不考虑切换瞬间的暂态过程。该模型既有离散变量,又有连续变量;既有简单的线性函数,又有复杂的非凸不可微的函数;既有简单的约束,也有复杂难于处理的约束。因此采用线性化技术,可以加快其计算速度。笔者做过对

比,若对上述模型不做处理直接优化,其中 0-1 变量有 264 个,计算算例 1 需 1 h 左右,而线性化以后计算速度不到 1 min。一系列算例说明了模型的有效性和经济性,该模型可推广之任意连续 t h 孤岛进行算例仿真,也可考虑不同电价下微网优化的经济成本。

参考文献:

- [1] 陆圣芝,胡伟,罗建裕. 江苏电网分层分区研究[J]. 江苏电机工程,2006,25(3):11-13.
- [2] FLUECK A, LI Z. Destination Perfection [J]. IEEE Power and Energy Magazine,2008,6(6):36-47.
- [3] KROPOSKI B, LASSETER R, ISE T, et al. Marking Microgrids Work [J]. IEEE Power and Energy Magazine,2008,6(3):40-53.
- [4] GOUVEIA C, MOREIRA J, MOREIRA C L et al. Coordinating Storage and Demand Response of Microgrid Emergency Operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2013,4(4):1898-1908.
- [5] MITRA J, VALLEM M. Determination of Storage Required to Meet Reliability Guarantees on Island-capable Microgrids with Intermittent Sources [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012,27(4):2360-2367.
- [6] 刘小平,丁明,张颖媛,等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2011,35(8):22-27.
- [7] 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.
- [8] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 集中控制式的微网系统的稳态建模与运行优化[J]. 电力系统自动化,2009,33(24):78-82.
- [9] 丁明,张颖媛,茆美玲,等. 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.
- [10] ARROYO J M, CONEJO A J. Optimal Response of a Thermal Unit to an Electricity Spot Market [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2000,15(3):1098-1104.
- [11] 吴雄,王秀丽,王建学,等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):1-8.
- [12] KHODAEI A. Microgrid Optimal Scheduling with Multiple-Period Islanding Constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,27(4):1-10.

作者简介:

王辉(1986),男,江苏阜宁人,硕士研究生,从事微电网经济运行优化研究工作。

Economic Optimization for Micro-grid Considering Islanding Constraints

WANG Hui

(Power Dispatching and Control Center, State Grid Yancheng Power Supply Company, Yancheng 224005, China)

Abstract: This paper presented an economic optimization model for micro-grid considering islanding constraints. In the model, grid-connected operation was the master problem taking minimizing the operation costs of micro-grid as the target, and islanded operation was the sub-problem taking minimizing the mismatches between power source and load of micro-grid as the target. Power source cutting 1 and load cutting 2 were generated to connect the master problem and the sub-problem, and were revised to optimize model's economic indexes. Considering the complication of model's target function and constraints, linearization technology was used to speed up the calculation. Some numerical simulations have demonstrated the correctness of the proposed economic optimization model for micro-grid.

Key words: micro-grid; grid-connected operation; islanded operation; energy storage; linearization