

含三端口电力电子变压器的交直流混合微网分层优化

黄堃¹, 郝思鹏¹, 宋刚², 乐君耀², 吴清¹, 张小莲¹

(1. 南京工程学院 江苏省主动配电网重点建设实验室, 江苏 南京 211167;

2. 中国能源建设集团 浙江省电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要:三端口电力电子变压器(PET)具有交流、直流接口,便于主网和交直流混合微网的协同优化。针对PET容量小、过载能力差的现状,提出一种分层优化模型:PET层以对公共耦合点负荷曲线削峰填谷为目标,从而优化主网、交流微网和直流微网的功率调度曲线;交流微网和直流微网以降低各自运行成本为目标、上层调度曲线为约束协调各微源出力,并在下层优化中计及了储能放电深度、荷电状态对运行成本的影响,将镜像转换和自适应惯性权重引入粒子群优化算法中对其进行求解。参照浙江某地交直流微网示范工程构建算例,验证了所提优化模型和求解方法的有效性。

关键词:三端口电力电子变压器;交直流混合微网;分层优化;储能损耗;镜像转换;自适应惯性权重

中图分类号:TM 41;TM 727

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003003

0 引言

交直流混合微网能高效集成不同形式的分布式电源(DG)和负载,提升了微网灵活性^[1-4]。为进一步提升微网对DG的控制能力,文献[5]提出以三端口电力电子变压器(PET)为并网接口和能量管理核心的交直流混合微网,利用三端口PET具有交流和直流接口、扩展灵活、潮流双向可控功能实现DG的灵活管理,从而支撑主网和交直流混合微网的协同优化。

国内外开展了三端口PET的样机研制,其中北卡大学实验样机容量为20 kV·A,中科院电工所实验样机容量为1 MV·A。目前三端口PET样机容量小,且其作为电力电子器件,不具备过载能力,限制了其在工程领域中的推广应用。交直流微网的运行优化主要以降低运行成本为目标^[6],文献[7]针对需求侧对实时电价的响应,建立了以交直流微网一天净收益最高为目标的优化模型;文献[8]考虑了源-荷随机性提出可用于计划功率调整的两阶段混合微网经济优化模型;文献[9]在交直流混合微网经济优化中考虑了不同运行模式,使优化模型更具适用性。上述研究通过优化微源出力提高了交直流微网的运行效益,但优化模型中未考虑荷电状态(SOC)和放电深度(DOD)对储能损耗成本的影响,且其研究对象为通过双向换流器互联的传统交直流微网。

针对含PET的交直流微网优化调度问题,文献[10]用PET的端口控制能力实现了不同微网的协调管理,但其模型结构单一;文献[11]根据交直流微网

在并网和离网模式下的运行特性,用不同策略进行优化,但未考虑并网点峰值功率大、三端口PET难以承载较大的并网功率的现状;文献[12]用PET对低压交流端口输出电压的调节能力,建立了以网损最小为目标并考虑电压不平衡度的优化模型,但忽视了微网运行的经济性,也未考虑PET难以承载较大的并网功率的问题。综上,现有研究均未考虑三端口PET难以承载较大的并网功率与微网经济运行结合的问题,现有微网经济调度模型未考虑SOC、DOD动态变化对储能损耗的影响,这与实际工程不符。

本文提出一种分层优化模型:上层以公共耦合点(PCC)负荷曲线削峰填谷为目标,优化主网、交流微网和直流微网的功率调度曲线,从而降低PET的峰值功率;下层以降低交流微网和直流微网运行成本为目标,以上层调度曲线为约束,协调各微源出力。在下层模型中提出采用一种积分模型描述储能损耗,提高了所建模型的精准度,利用改进的粒子群优化(PSO)算法结合YALMIP工具箱对模型进行求解。

1 三端口PET并网的交直流混合微网结构

参照浙江某地交直流混合微网示范工程,构建如图1所示的示意图。主网为10 kV配网,通过PET

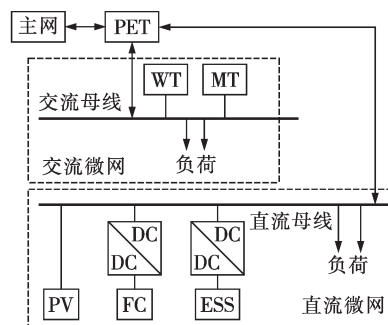


图1 基于三端口PET的交直流混合微网

Fig.1 AC/DC hybrid microgrid based on three-port PET

收稿日期:2019-06-17;修回日期:2020-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607083);江苏省高校自然科学研究重大项目(17KJA470003)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607083) and the Grant University Science Research Project of Jiangsu Province(17KJA470003)

联结形成交流微网和直流微网。风机(WT)、微型燃机(MT)接入交流微网,燃料电池(FC)、光伏(PV)和储能系统(ESS)接入直流微网。潮流在PET的3个端口间双向可控,便于协调主网、交流微网和直流微网的功率交换。而传统交直流微网只在交流侧并网,直流微网通过双向逆变器与交流侧相连,无法与主网进行功率交换,控制灵活性不足。

2 分层优化模型

分层优化适用于协调具有不同优化目标且决策变量有差异的个体间利益。为兼顾三端口PET容量小、过载能力差的现状和微网运行效益,本文采用以下2层策略:PET为上层,以对PCC负载曲线削峰填谷为目标确定主网、交流微网和直流微网的功率调度曲线;微网为下层,以降低区域运行成本为目标、上层调度曲线为约束协调各微源出力。本文假设交流微网和直流微网代表不同利益主体,各自对区域内微源设备进行调度,该假设降低了模型求解难度。

2.1 PET层优化模型

2.1.1 目标函数

对PCC负荷曲线削峰填谷可降低PET的负荷峰值,保证其有足够的调节余量应对微网中潜在的功率波动,并降低并网时PET的容量。文献[13]利用负荷曲线方差衡量削峰填谷效果,但仅通过降低负荷曲线方差难以完整反映负荷特性,故引入负荷率,建立以降低PCC负荷曲线方差、提高负荷率为目标的PET层优化模型:

$$\min f_1 = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} \left(P(t) - \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} P(j) \right)^2 \quad (1)$$

$$\min f_2 = 1 - \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} P(j) / P_{\max} \quad (2)$$

其中, N_t 为调度周期时段数; $P(t)$ 、 $P(j)$ 分别为第 t 时段和第 j 时段PCC负荷功率; $P_{\max}$ 为最大负荷。对于PCC而言,主网、交流微网和直流微网均为双向可调负荷,没有固定的负荷侧,故用式(3)计算负载功率。

$$P(t) = \frac{1}{2} \left(\left| P_{\text{grid}}(t) \right| + \left| P_{\text{AC}}(t) \right| + \left| P_{\text{DC}}(t) \right| - P_{\text{loss}}(t) \right) \quad (3)$$

其中, $P_{\text{grid}}(t)$ 、 $P_{\text{AC}}(t)$ 、 $P_{\text{DC}}(t)$ 分别为第 t 时段PET主网接口、交流微网接口、直流微网接口的输出功率; $P_{\text{loss}}(t)$ 为第 t 时段PET的出口换流器的功率损耗。换流器各相的功率损耗与该相的输出电流之间近似呈现二次关系,即:

$$P_{\text{loss,ac-dc}}^{\varphi} = a + bI_{\text{ac}}^{\varphi} + c(I_{\text{ac}}^{\varphi})^2 \quad (4)$$

其中, a 、 b 、 c 为通过MATLAB拟合工具得到的参数; I_{ac}^{φ} 为PET相 φ 的输出电流。假设PET联结的为三相对称负载, P_{loss} 可表示为:

$$P_{\text{loss}} = 3a + cI_{\text{ac}}^2 \quad (5)$$

其中, I_{ac} 为交流微网母线电流,其值如式(6)所示。

$$I_{\text{ac}}^2 = P_{\text{loss,AC}} / R_l \quad (6)$$

其中, $P_{\text{loss,AC}}$ 为交流微网线损,可根据下层优化模型结果求出; R_l 为交流微网线路等效电阻。

2.1.2 约束条件

(1)功率平衡约束。

$$-P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{AC}}(t) + P_{\text{DC}}(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (7)$$

(2)PET输出功率约束。

$$0 < P_{\text{pet}}(t) < P_{\text{pet,max}} \quad (8)$$

其中, $P_{\text{pet,max}}$ 为PET输出的有功功率限值。

2.2 微网层优化模型

下层模型中,交流微网和直流微网根据上层优化确定的功率调度曲线,以各自区域的运行成本最低为目标协调微源出力,并在计算运行成本时提出一种积分模型描述储能损耗,提高了优化模型精度。

2.2.1 交流微网优化模型

交流微网运行成本 C_{AC} 包括微型燃机燃料成本 $C_{\text{f,a}}$ 、治污成本 $C_{\text{e,a}}$ 、各设备维护成本 $C_{\text{o,a}}$ 和购电成本 $C_{\text{grid,a}}$,目标函数为:

$$\min C_{\text{AC}} = C_{\text{f,a}} + C_{\text{e,a}} + C_{\text{o,a}} + C_{\text{grid,a}} \quad (9)$$

$$C_{\text{f,a}} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_{\text{MT}}} f_{\text{MT}}(P_{\text{MT},j}(t)) \quad (10)$$

$$C_{\text{e,a}} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{\theta=1}^N \lambda_{\text{MT}}^{\theta} c^{\theta} P_{\text{MT}}(t) \quad (11)$$

$$C_{\text{o,a}} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{m_a} \gamma_i P_i(t) \quad (12)$$

$$C_{\text{grid,a}} = \sum_{t=1}^{N_t} [P_{\text{grid,a}}(t) q_{\text{grid}}(t) + P_{\text{d,a}}(t) q_{\text{grid}}(t)] \quad (13)$$

其中, N_{MT} 为微型燃机数; $f_{\text{MT}}()$ 为燃料成本函数; θ 为污染物类别; N 为污染物类别数; $\lambda_{\text{MT}}^{\theta}$ 、 c^{θ} 分别为微型燃机污染物 θ 的排放系数和单位排放量治理费用; γ_i 和 $P_i(t)$ 分别为第 i 个微源维护系数和发电功率; m_a 为交流微网的微源数; $P_{\text{grid,a}}(t)$ 、 $P_{\text{d,a}}(t)$ 分别为第 t 时段交流微网与主网、交流微网与直流微网间的传输功率; $q_{\text{grid}}(t)$ 为第 t 时段交流微网购电或售电价格。

交流微网在运行中需满足以下约束。

(1)功率平衡约束。

$$P_{\text{L-AC}}(t) + P_{\text{loss,AC}}(t) - \sum_{i=1}^{m_a} P_i(t) = P_{\text{AC}}(t) \quad (14)$$

$$P_{\text{loss,AC}}(t) = \sum_{l_1 \in S_{\text{ac}}} [P_{l_1}^2(t) + Q_{l_1}^2(t)] R_{l_1} / U_{\text{N,ac}}^2 \quad (15)$$

其中, $P_{\text{L-AC}}(t)$ 为交流微网负载; S_{ac} 为交流侧各设备与交流母线之间的馈线集合; $P_{l_1}(t)$ 和 $Q_{l_1}(t)$ 分别为第 t 时段通过馈线 l_1 的有功和无功功率; R_{l_1} 为馈线 l_1 的电阻; $U_{\text{N,ac}}$ 为交流微网母线额定电压。

(2)微源有功功率约束。

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (16)$$

(3) 微型燃机爬坡率约束。

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \leq \delta_{MT} \Delta t \quad (17)$$

其中, $P_{i,\min}$ 为第 i 个微源最小出力; $P_{i,\max}$ 为第 i 个微源最大出力; δ_{MT} 为微型燃机爬坡率限值。

2.2.2 直流微网优化模型

(1) 直流侧目标函数。

直流侧运行成本包括储能损耗成本 C_{SB} 、燃料电池燃料成本 $C_{f,d}$ 、治污成本 $C_{e,d}$ 、维护成本 $C_{O,d}$ 以及购电成本 $C_{grid,d}$, 目标函数为:

$$\min C_{DC} = C_{SB} + C_{f,d} + C_{e,d} + C_{O,d} + C_{grid,d} \quad (18)$$

a. 储能损耗成本。

传统储能(本文用蓄电池(SB))损耗模型(见附录A)将单位电量损耗成本视为常数,为描述DOD、SOC对储能损耗的影响,文献[14]提出用期望千瓦时吞吐量 A 和有效累计千瓦时吞吐量 A_c 评估储能损耗:

$$A = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I E DOD_i C_i \quad (19)$$

其中, E 为额定容量; DOD_i 为任意DOD; C_i 为该DOD下电池达到报废的充电次数(见附录A中图A1)。 A 是标准情况下计算所得,偏离标准情况(如SOC变化)时,通过电池的有效累计吞吐量 A_c 也会变化,电池在一段时间内的实际损耗为:

$$L_{loss} = A_c / A, A_c = \lambda A' \quad (20)$$

其中, A' 为流过电池的实际能量; λ 为有效权重因子,是关于SOC的拟合函数。图2为 λ 与SOC的关系^[14]。由图可知, SOC=0.5时,流出电池1 kW·h的能量等效于流出1.3 kW·h的有效累积千瓦时吞吐量;而SOC=1时,流出电池1 kW·h的能量只等效于流出0.55 kW·h的有效累积千瓦时吞吐量。

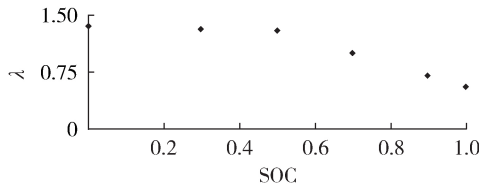


图2 λ 与SOC之间的关系

Fig.2 Relationship between λ and SOC

上述模型计及了DOD和SOC对电池寿命的影响,提高了建模精度,但该模型将SOC作为一个离散变量来确定其对应的权重系数,实际电池在充放电过程中,SOC是连续动态变量,故本文提出用一种积分模型描述SOC、 λ 、 A_c 间的关系,具体模型如下:

$$A_c^* = \frac{\int_{SOC(t)}^{SOC(t+\Delta t)} \lambda dSOC}{\Delta SOC} A_c', \lambda = f(SOC(t)) \quad (21)$$

损耗成本为:

$$C_{SB} = C_{init} A_c^* / A \quad (22)$$

其中, A_c^* 为积分模型下的有效累计千瓦时吞吐量; ΔSOC 为 Δt 时段内SOC变化量; C_{init} 为储能初始投资成本。由图2可知, SOC>0.5时, λ 与SOC近似呈线性关系:

$$\lambda = k_1 SOC + k_2 \quad (23)$$

其中, k_1, k_2 为拟合得到的参数。

b. 维护成本、燃料成本、治污成本和购电成本。

维护成本、燃料成本、治污成本和购电成本计算公式与交流微网中对应的成本类似,不再赘述(具体公式见附录A)。

(2) 直流侧约束条件。

a. 功率平衡约束。

$$P_{L-DC}(t) + P_{loss,DC}(t) - \sum_{i=1}^{m_d} P_i(t) = P_{DC}(t) \quad (24)$$

$$P_{loss,DC}(t) = \sum_{l_2 \in S_{dc}} P_{l_2}^2(t) R_{l_2} / U_{N,dc}^2 \quad (25)$$

其中, $P_{L-DC}(t)$ 为直流微网负载; $P_{loss,DC}$ 为直流侧线损; m_d 为直流微网中DG数; S_{dc} 为直流侧各设备与直流母线之间的馈线集合; $P_{l_2}(t)$ 为第 t 时段通过馈线 l_2 的有功功率; R_{l_2} 为馈线 l_2 的电阻; $U_{N,dc}$ 为直流微网母线额定电压。

b. 微源有功约束。

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (26)$$

c. 蓄电池运行状态约束。

$$P_{SB,\min} \leq P_{SB} \leq P_{SB,\max} \quad (27)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (28)$$

其中, $P_{SB,\min}$ 、 $P_{SB,\max}$ 分别为蓄电池出力的最小值、最大值; $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$ 分别为SOC最大值、最小值。

综上,本文构建的基于三端口PET的交直流混合微网2层优化模型可简化为:

$$\begin{cases} \min f_1 = \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} \left(P(t) - \frac{1}{N_t} \sum_{j=1}^{N_t} P(j) \right)^2 \\ \min f_2 = 1 - \frac{1}{N_t} \sum_{t=1}^{N_t} P(t) / P_{\max} \\ \text{s.t. 式 (7)、(8)} \\ P(t) = 0.5 \left(|P_{grid}(t)| + |P_{AC}(t)| + |P_{DC}(t)| - P_{loss}(t) \right) \\ P_{loss} \text{ 根据下层优化模型确定} \\ \begin{cases} \min C_{AC} \\ \text{s.t. 式 (14)—(17)} \end{cases}, \begin{cases} \min F_{DC} \\ \text{s.t. 式 (24)—(28)} \end{cases} \end{cases} \quad (29)$$

上层模型对PCC负载削峰填谷时需考虑PET的功率损耗,该值根据下层优化确定的微网运行点不断修正。微网运行方案的制定是以上层调度曲线为

前提,该调度曲线取决于PCC负载的削峰填谷策略。

3 改进的PSO算法

对构建的2层优化模型采用PSO算法结合YALMIP工具箱进行求解。上层模型用PSO算法求解,各粒子的位置由削峰填谷策略决定;下层模型调用YALMIP工具箱求解,由下层优化结果更新上层目标函数并评价粒子适应度。为避免PSO算法陷入局部最优和增强算法搜索能力,本文进行以下改进。

(1)为避免算法受函数形态影响陷入局部最优,在评价粒子适应度时先对目标函数镜像转换,使粒子尽快离开局部最优。具体转换方式如下:

$$T(x) = \begin{cases} F(x) & F(x) < o \\ o + h - (F(x) - o) & o \leq F(x) \leq o + h \\ o & F(x) > o + h \end{cases} \quad (30)$$

其中, $F(x)$ 为目标函数值; $T(x)$ 为镜像转换后目标函数值; h 为最优转换高度。依据粒子当前位置与已知最优之间的距离,将已知最优 o (当前最小值)转换为局部最大,即 $T(x) = o + h - (F(x) - o)$;当 $F(x) > o + h$ 时,转换高度无法弥补 $F(x) - o$ 的值,将 $T(x)$ 直接设置为 o ;当前解比已知最优 o 小时,保留当前解 $F(x)$ 。

理论上, h 取任意正数均可将已知最优拉升为局部最大,逆转原始吸引区域,但 h 过小会导致逆转区域过小,无法产生有效吸引, h 过大会降低算法收敛速度,故本文取 $h = 1000$ 。

(2)惯性权重 ω 是PSO算法的重要参数, ω 较大利于增强算法全局搜索能力, ω 较小利于对当前区域进行精确搜索,为平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力,提出一种动态惯性权重调整方法如下:

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} + \frac{|2F - F_{\text{avg}} - F_{\min}|}{F_{\text{avg}} - F_{\min}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) & F \leq F_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & F > F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (31)$$

其中, $\omega_{\min}$ 、 $\omega_{\max}$ 分别为惯性权重的最小值和最大值; F_{avg} 、 $F_{\min}$ 分别为当前粒子的平均值和最小值。

相对于固定权重,惯性权重 ω 随着粒子目标函数值而自动调整。当粒子目标值趋于一致或局部最优时,增大 ω 值以增强全局搜索能力;当目标值较为分散时,减小 ω 值,有利于局部区域精确搜索。

算法具体实施过程如下。

步骤1:设定算法参数,随机初始化上层粒子群。

步骤2:求解每个上层粒子对应的交流区和直流区功率调度曲线,利用YALMIP工具箱求解下层微网运行方案和运行成本,根据下层求解结果更新上层目标函数。

步骤3:对上层目标函数镜像转换,评价各粒子

适应度,将各粒子位置和适应度存储于 p_{best} 中,将 p_{best} 中的最优个体信息存于 g_{best} 。

步骤4:判断算法是否达到迭代次数或收敛条件,若达到则结束算法并输出全局最优粒子表示的交流微网、直流微网和主网调度策略,根据该策略调用YALMIP工具箱求解交流区、直流区运行方案并输出结果,否则转到步骤5。

步骤5:采用式(32)所示的速度更新公式和位置更新公式对粒子进行操作。

$$\begin{cases} v_i^{j+1} = \omega v_i^j + c_1 r_1 (p_{\text{best},i}^j - x_i^j) + c_2 r_2 (g_{\text{best},i}^j - x_i^j) \\ x_i^{j+1} = x_i^j + v_i^{j+1} \end{cases} \quad (32)$$

其中, i 为粒子的编号,且 $i = 1, 2, \dots, N_p$, N_p 为种群的粒子总数; j 为当前迭代次数; $p_{\text{best},i}^j$ 为第 j 次迭代后粒子个体极值点; $g_{\text{best},i}^j$ 为整个种群到第 j 次迭代为止搜索到的全局极值点; v_i^j 、 v_i^{j+1} 分别为第 i 个粒子在第 j 次和第 $j+1$ 次迭代中的速度; x_i^j 、 x_i^{j+1} 分别为第 i 个粒子在第 j 次和第 $j+1$ 次迭代中的位置; c_1 、 c_2 为学习因子,一般均取2; r_1 、 r_2 为介于0~1的随机数。

步骤6:按照式(31)更新惯性权重 ω ,并转至步骤2。

4 算例分析

4.1 仿真数据

本文参照浙江某交直流微网示范工程相关模型进行算例分析,微网结构及线路阻抗参数见附录B。设PET各端口输出功率上限为100 kW,各微源参数见表1,蓄电池参数如下:容量为600 kW·h,功率下限为40 kW,功率上限为60 kW,初始投资为180万元。分时电价、污染物排放系数及治理成本见文献[15-16],SOC范围为[0.5, 0.9],SOC初始值为0.7。PSO算法中,迭代次数为500,种群数为50,学习因子均为2,最大惯性权重为0.9,最小惯性权重为0.4,收敛精度为 10^{-3} 。

表1 各微源参数

Table 1 Paramaters of different micro sources

电源	功率下限/ kW	功率上限/ kW	维护成本/ (元·kW ⁻¹)
风机	0	200	0.03
微型燃机	20	80	0.06
光伏	0	150	0.02
燃料电池	8	40	0.08

PET层优化模型中, f_1 、 f_2 量纲不同,为避免优化结果受其影响,采用归一化处理^[17]选取折中解。定义处理后的函数如下:

$$F_i(X) = \frac{f_i(X) - f_{i\min}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \quad (33)$$

其中, $f_{i\max}$ 、 $f_{i\min}$ 分别为 f_i 的上、下限。 $F_i = 0$ 时表示对

优化结果完全满意, $F_i = 1$ 时表示完全不满意。

本文选取典型日(均分为24个时段)风、光资源及交直流负荷见图3。

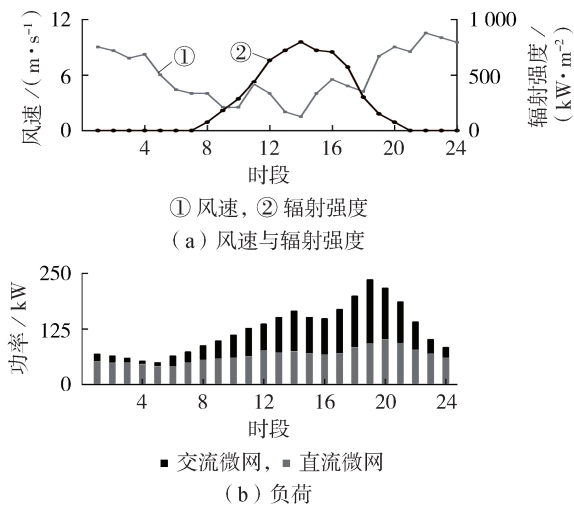


图3 典型日风、光资源及负荷

Fig.3 Daily wind and solar resources and loads

4.2 优化结果分析

图4为采用2层优化模型时PET各端口净负载功率及对应的各微源的出力曲线。

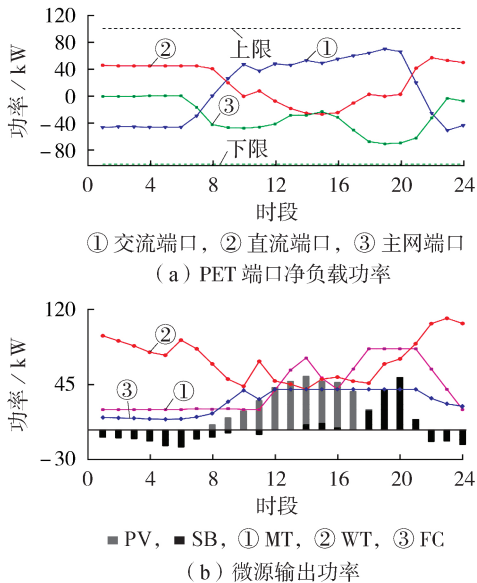


图4 2层模型优化结果

Fig.4 Optimization results of two-layer model

2层优化模型优先考虑对PET输出功率削峰填谷,夜间风电充足而负载较小,交流微网区富余功率大,需通过弃风降低PET交流端口的输出功率;白天负荷较高,不需要利用弃光降低直流端口功率。微网层根据上层调度优先考虑经济环境效益较好的风电、光伏以满足负荷需求,储能夜间充电,将廉价电能转移到白天及负载晚高峰时段。微型燃机和燃料

电池发电成本高,仅在风、光、储无法满足供电需求时增大出力。

4.3 不同优化方法对比

为验证2层优化模型的优化效果,设置以下算例进行对比:算例1,采用传统经济最优模型;算例2,采用本文所提2层优化模型。

图5为不同算例下优化后的PCC功率曲线。可见算例1中只考虑微网的经济运行,在夜间风电充足及负载晚高峰时段,PET的输出功率多次接近或达到限值,不利于系统平稳运行;而算例2优先考虑对PET输出功率曲线削峰填谷,通过在夜间适当弃风和在负载高峰期增大各微源的出力保证了PET的输出功率在整个调度周期内较为平稳,即使在19:00后的负载晚高峰期也有较大的调节余量平抑微网中可能出现的功率波动。

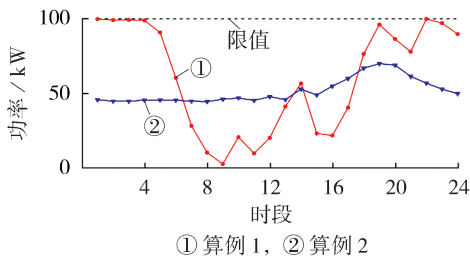


图5 PCC功率对比

Fig.5 Comparison of PCC power

表2为不同算例下的上层模型优化结果。算例1以微网经济运行为目标,PET的负载功率由负载水平、风光预测出力以及外网电价决定,最大负载为99.9 kW,达到功率限值。作为电力电子器件,PET不具备传统变压器的短时过载能力,对于微网此时可能存在的功率波动,PET的功率调节余量明显不足,不利于系统稳定运行。而算例2通过对PET输出功率削峰填谷,最大输出功率仅为69.4 kW,提高了微网运行的稳定性。从微网建设角度考虑,长期供电变压器一般以最大负荷除以0.65为最大输出功率,以该调度周期为例,算例1需用最大输出功率为154 kW的PET作为微网并网工具。而算例2中,用最大输出功率为106 kW的PET即可满足建设需要,缓解了容量不足对PET在工程应用中的限制。

表2 不同算例下上层结果对比

Table 2 Comparison of upper-layer results between different cases

算例	f_1 / kW^2	f_2	PET功率峰值 / kW
1	1 228	0.605	99.9
2	67.03	0.738	69.4

表3为各算例下微源发电成本(包括储能损耗、燃料、维护、环境成本)、交流微网与直流微网间的功率交换成本(正值代表购电、负值代表售电)、微网向

主网的购电成本及总成本。与上层模型相对应,算例2中,交流微网区和直流微网区的运行成本较算例1增加了8.4%,主要原因是在夜间弃风导致储能转移的廉价电量减少,而燃机发电量、燃料电池发电量及日间购电量增加。但算例2中,微网在建设时可采用容量较小的PET,若将其采购费用分摊到微网日运行成本中,可降低上层优化导致的经济损失。

表3 不同优化策略下下层结果对比

Table 3 Comparison of lower-layer results between different cases

算例	区域	微源发电成本/元	功率交换成本/元	购电成本/元	总成本/元
1	交流区	1282	-42	377	1617
	直流区	616	42	92	750
2	交流区	1328	-72	458	1714
	直流区	652	72	128	852

为验证所提储能积分损耗模型的有效性,设置算例3与算例2进行对比。算例3采用2层优化模型,下层模型中采用常数模型描述储能损耗。

表4为采用不同损耗模型时的目标函数及储能运行状况优化结果。可见采用积分模型时,该调度周期内储能转移电量为239 kW·h,储能损耗成本约为52元;而采用传统常数模型时,蓄电池转移电量降低了16 kW·h,损耗成本却增加了约13元,这是因为采用积分模型计算损耗 C_{sb} 时,储能系统会尽量工作在SOC为较大值的状态,降低了单位电量损耗成本。

表4 不同损耗模型优化结果

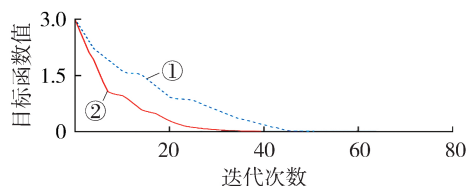
Table 4 Optimization results of different loss models

储能损耗模型	蓄电池转移电量/(kW·h)	C_{sb} /元	储能损耗偏差/%
积分模型	239	52.3	0
常数模型	223	65.2	25

4.4 不同求解方法对比

图6为采用PSO算法和所提改进的PSO算法求解算例2时的收敛曲线。由图可知,PSO算法在迭代了52次时才达到收敛精度,而本文改进的算法迭代41次后便达到收敛条件,收敛速度更快。

表5比较了用不同算法求解算例2时的具体结果。可见用PSO算法求解时,交直流混合微网在调



① PSO算法, ② 改进的 PSO 算法

图6 不同算法收敛曲线

Fig.6 Convergence curves of different algorithms

度日的运行费用为2579元,PET的最大输出功率为71.2 kW;用改进的PSO算法求解时,微网在该调度日总运行费用降低了13元,PET峰值功率降低了1.8 kW,为交直流混合微网提供了更合理的运行方案。

表5 不同算法结果对比

Table 5 Result comparison between different algorithms

算法	f_1 /kW ²	f_2	C_{AC} /元	C_{DC} /元	PET输出功率/kW
PSO	68.3	0.732	1718	861	71.2
改进的 PSO	67.03	0.738	1714	852	69.4

5 结论

(1)本文建立了一种分层优化模型,分别对PET层和微网层进行协调优化,降低了并网所需的PET容量,并兼顾了微网运行经济性;

(2)在对微网层优化时,提出一种积分模型描述储能损耗,使所建模型更符合工程实际;

(3)采用改进的PSO算法能避免优化结果陷入局部最优引力中心,加快了算法收敛速度和增大了求解精度。

本文是从日前优化角度出发构建优化模型,未考虑光伏、风电、负载实时出力与日前调度的偏差,如何减小实时偏差对日前调度策略的影响还有待进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] NEJABATKHAH F, LI Y W. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [2] MALIK S M, AI X, SUN Y, et al. Voltage and frequency control strategies of hybrid AC/DC microgrid: a review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(2): 303-313.
- [3] 何红玉, 韩蓓, 徐晨博, 等. 交直流混合微电网一致性协调优化管理系统[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 138-146. HE Hongyu, HAN Bei, XU Chenbo, et al. Optimal management system of hybrid AC/DC microgrid based on consensus protocols[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 138-146.
- [4] 杨健, 唐飞, 廖清芬, 等. 考虑可再生能源随机性的微电网经济性与稳定性协调优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 179-184. YANG Jian, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Microgrid economy and stability coordinated optimization considering randomness of renewable energy resource[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 179-184.
- [5] 兰征, 涂春鸣, 肖凡, 等. 电力电子变压器对交直流混合微网功率控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 50-57. LAN Zheng, TU Chunming, XIAO Fan, et al. The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 50-57.
- [6] 汪湘晋, 赵波, 吴红斌, 等. 并网型交直流混合微电网优化配置分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 55-62. WANG Xiangjin, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal sizing

- analysis of grid-connected hybrid AC-DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 55-62.
- [7] 陈安伟, 华浩瑞, 李鹏, 等. 实时电价机制下交直流混合微网优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-20.
CHEN Anwei, HUA Haorui, LI Peng, et al. Optimal operation of AC/DC hybrid micro-grid based on real-time price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 13-20.
- [8] EAJAL A A, SHAABAN M F, PONNAMBALA K, et al. Stochastic centralized dispatch scheme for AC/DC hybrid smart distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1046-1059.
- [9] 徐冬冬. 考虑不同运行模式的交直流混合微电网优化运行方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
XU Dongdong. Optimal operation method of AC/DC hybrid microgrid considering different operation modes[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [10] 王弦, 刘建华, 向加佳, 等. 基于电力电子变压器的能量路由器研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(11): 4-8.
WANG Xian, LIU Jianhua, XIANG Jiajia, et al. Research on power router based on power electronic transformer[J]. Automation and Instrumentation, 2016(11): 4-8.
- [11] VNSR J, ANSHUMAN S. Integration of AC and DC sources using Multi-Source Fed Power Electronic Transformer (MSF-PET) for modern power distribution system applications[C]// 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2016: 1-9.
- [12] 董雷, 张涛, 蒲天骄, 等. 含电力电子变压器的交直流配电网电压不平衡优化抑制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3609-3615.
DONG Lei, ZHANG Tao, PU Tianjiao, et al. Optimization method for voltage imbalance suppression of AC/DC distribution network with PET[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3609-3615.
- [13] 陈满, 陆志刚, 刘怡, 等. 电池储能系统恒功率削峰填谷优化策略研究[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 232-237.
CHEN Man, LU Zhigang, LIU Yi, et al. Research on optimal peak load shifting strategy of battery energy system operated in constant power model[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 232-237.
- [14] ZHAO B, ZHANG X, CHEN J, et al. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 934-943.
- [15] 邱海峰, 赵波, 林达, 等. 计及储能损耗和换流成本的交直流混合微网区域协调调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 29-37.
QIU Haifeng, ZHAO Bo, LIN Da, et al. Regional coordinated dispatch in AC/DC hybrid microgrids considering energy storage loss and converter cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 29-37.
- [16] 胡晓通, 刘天琪, 刘舒, 等. 基于动态奖惩电价的微电网与配网协调优化运行[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 33-40.
HU Xiaotong, LIU Tianqi, LIU Shu, et al. Coordinated optimal operation between microgrid and distribution network based on dynamic award and penalty price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 33-40.
- [17] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 143-148.
LIU Wenying, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 143-148.

作者简介:



黄堃

黄堃(1990—),男,江苏徐州人,硕士,研究方向为电力电子变压器与微网协调控制(E-mail: 1161844712@qq.com);

郝思鹏(1971—),男,江苏扬州人,教授,博士,通信作者,研究方向为配电网自动化与三相不平衡治理(E-mail: 63301300@qq.com)。

(编辑 李玮)

Layered optimization of AC/DC hybrid microgrid with three-port power electronic transformer

HUANG Kun¹, HAO Sipeng¹, SONG Gang², LE Junyao², WU Qing¹, ZHANG Xiaolian¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of Active Distribution Grid, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The three-port PET (Power Electronic Transformer) has AC and DC ports, and it is convenient for the coordinate optimization of main grid and AC/DC hybrid microgrid. In view of the small capacity and poor overload capability of PETs, a layered optimization model is proposed. At PET layer, the target is the peak load shifting of PCC (Point of Common Coupling) load curves, so as to optimize the power scheduling curves of main grid, AC microgrid and DC microgrid. At microgrid layer, the target is to minimize operating cost of AC and DC microgrid, and PET-layer scheduling curves are used as constraints to coordinate the output of each micro source. At the same time, the influences of discharge depth of energy storage and state of charge on operating cost are considered in microgrid-layer optimization model. The mirror conversion and adaptive inertia weight are induced to particle swarm optimization algorithm to solve the model. Taking the demonstration project of AC/DC microgrid in Zhejiang province as a case, and the case results verify the effectiveness of the proposed optimization model and solution method.

Key words: three-port power electronic transformer; AC/DC hybrid microgrid; layered optimization; energy storage loss; mirror conversion; adaptive inertia weight

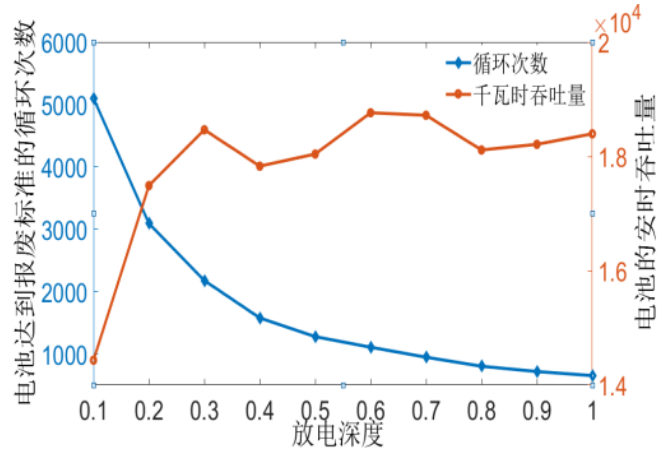
附录

附录 A

传统储能损耗模型：

$$\begin{cases} C_{SB} = m_{SB} \sum_{t=1}^N |P_{SB}(t)| \Delta t \\ m_{SB} = \frac{C_{init}}{Q_{SB}} \end{cases} \quad (A1)$$

其中， m_{SB} 为单位电量损耗成本； $P_{SB}(t)$ 为储能在 Δt 时段充放电功率； C_{init} 为储能初始投资成本； Q_{SB} 为全寿命周期充放电电量，取近似常量。由于该模型将 Q_{SB} 取为常量，故 m_{SB} 也被折算为常量。



注：图中电池千瓦时吞吐量为关于电池容量的标么值。

图 A1 DOD 与电池循环次数及安时吞吐量关系曲线

Fig.A1 Relationship between DOD and battery cycle times and A · h throughput

直流微源维护成本：

$$C_{O,a} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{m_d} \gamma_i P_i(t) \quad (A2)$$

燃料电池燃料成本：

$$C_{f,d} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_{FC}} f_{FC}(P_{FC,j}(t)) \quad (A3)$$

直流微网治污成本：

$$C_{e,a} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{\theta=1}^N \lambda_{MT}^{\theta} c^{\theta} P_{FC}(t) \quad (A4)$$

直流微网购电成本：

$$C_{grid,d} = \sum_{t=1}^{N_t} [P_{grid,d}(t) q_{grid}(t) - P_{a-d}(t) q_{grid}(t)] \quad (A5)$$

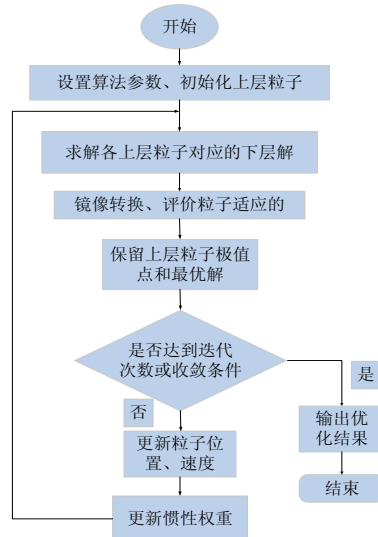


图 A2 算法流程图
Fig.A2 Algorithm flowchart

附录 B

图 B1 所示的含三端口 PET 的交直流混合网络结构，其中，交流微网电压等级为 400 V，共有 8 个节点，单位长度的线路阻抗为 $0.24 + j0.077 \Omega/\text{km}$ ，直流微网电压等级为 750 V，共有 7 个节点，单位长度的线路阻抗为 $0.0754 \Omega/\text{km}$ 。各节点间线路的长度以及节点负荷参数见表 B1—B4。

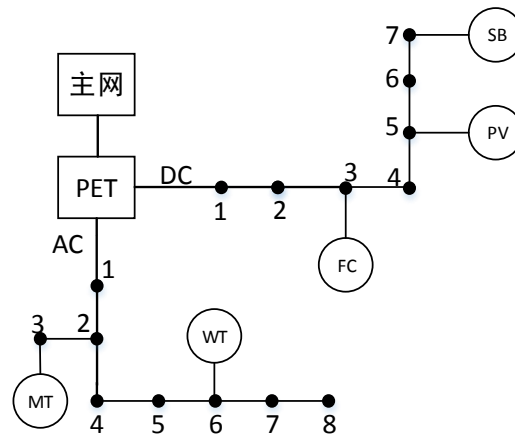


图 B1 基于三端口 PET 的交直流混合网络结构
Fig.B1 AC/DC hybrid microgrid structure based on three-port PET

表 B1 交流微网线路参数

Table B1 AC microgrid line parameters

起始节点	终止节点	线路全长/m	起始节点	到达节点	线路全长/m
1	2	45	4	5	45
2	3	40	5	6	55
2	4	50	6	7	60
2	3	60	7	8	50

表 B2 直流微网线路参数

Table B2 DC microgrid line parameters

起始节点	终止节点	线路全长/m	起始节点	到达节点	线路全长/m
1	2	40	4	5	40
2	3	40	5	6	50
3	4	55	6	7	65

表 B3 交流微网节点负荷

Table B3 Node load of AC microgrid

时段	节点 1		节点 2		节点 3		节点 4	
	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar
1	8	5	7	4	8	5	9	6
2	7	4	6	3	9	5	10	6
3	6	3	7	4	8	5	9	5
4	6	3	6	4	7	4	7	3
5	5	2	6	3	6	3	8	5
6	7	4	8	5	8	4	10	6
7	8	4	10	6	9	6	11	7
8	10	6	11	7	11	6	12	8
9	11	6	11	7	12	6	13	6
10	12	7	13	6	13	7	14	8
11	14	8	16	9	15	8	15	8
12	16	9	17	9	17	10	16	8
13	18	9	19	10	18	9	18	10
14	19	11	21	11	19	10	20	9
15	17	9	20	11	16	9	19	12
16	16	10	19	11	17	9	20	12
17	18	10	21	13	19	10	22	11
18	22	12	24	13	23	12	25	13
19	26	14	28	16	29	15	28	14
20	25	11	26	12	26	12	27	14
21	21	13	22	10	22	11	23	12
22	16	9	16	10	17	9	18	10
23	11	6	11	6	12	7	13	6
24	9	4	8	5	11	5	10	6

时段	节点 5		节点 6		节点 7		节点 8	
	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar	P/kW	Q/kvar
1	10	5	7	3	9	5	9	6
2	11	5	6	3	7	4	7	4
3	9	6	7	4	6	3	6	4
4	7	5	6	4	7	4	5	3
5	7	4	5	3	6	4	5	3
6	8	5	7	4	8	5	7	4

7	9	5	8	4	9	5	8	4
8	11	5	10	6	11	6	10	5
9	12	7	12	5	13	6	13	7
10	14	6	14	7	15	8	15	7
11	16	9	15	7	17	10	17	9
12	17	9	16	10	18	9	18	8
13	19	10	18	9	20	12	20	11
14	21	12	20	12	23	13	21	11
15	20	12	18	10	20	11	20	12
16	21	13	17	10	21	12	19	11
17	22	13	20	12	24	14	22	12
18	26	14	24	12	28	17	26	15
19	31	17	29	16	33	18	31	17
20	28	13	26	13	30	17	28	15
21	25	14	22	12	26	14	24	13
22	19	11	16	10	20	11	18	10
23	14	8	11	7	15	8	13	7
24	11	6	9	5	13	7	11	6

表 B4 直流微网节点负荷
Table B4 Node load of DC microgrid

时段	节点1	节点2	节点3	节点4	节点5	节点6	节点7
	P/kW	P/kW	P/kW	P/kW	P/kW	P/kW	P/kW
1	7	6	6	7	8	9	7
2	6	7	6	6	9	8	7
3	6	8	6	7	7	7	6
4	5	7	6	6	7	6	7
5	4	5	6	5	7	5	7
6	4	4	6	5	7	6	6
7	8	7	7	6	8	8	4
8	9	8	8	7	9	7	6
9	8	9	8	6	8	9	8
10	8	10	7	7	9	8	9
11	8	10	8	9	8	10	9
12	10	11	10	11	10	12	11
13	9	10	9	11	10	11	10
14	9	10	9	11	11	12	11
15	8	9	9	10	10	12	10
16	8	9	9	10	9	11	9
17	9	10	9	10	10	11	9
18	11	12	11	12	12	13	11
19	13	14	12	12	14	13	12

20	14	16	14	12	14	16	14
21	12	15	13	11	13	15	13
22	11	12	10	10	10	12	11
23	10	8	10	9	9	11	10
24	8	6	7	9	8	11	9
