

多级闪蒸海水淡化与水电联产模拟与优化

伍联营,王慧敏,胡仰栋,高从堦

(中国海洋大学化学化工学院,山东 青岛 266100)

摘要:海水淡化技术已成为解决淡水资源紧缺的有效途径之一。将贯通型(OTMSF)、带有盐水循环器(MMSF)和带有排热段(CMSF)的3种不同结构的多级闪蒸(Multi-stage flash,MSF)海水淡化装置分别与水电联产进行集成,并建立集成系统的数学模型,以最大经济效益为优化目标,探讨各操作参数和结构参数对集成系统性能的影响。结果表明,产水量一定时,3种集成系统的经济效益均随闪蒸级数的增大呈现出先增大后减小的变化趋势,而发电量则均出现下降的趋势。产水量 M_d 增大时,CMSF和OTMSF系统的总经济效益均增大,且OTMSF的总经济效益高于CMSF,MMSF的经济效益明显低于前两种,其变化趋势是先升高后下降。

关键词:多级闪蒸;水电联产;模拟;优化;集成

中图分类号: P747+.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-3770(2011)07-0057-004

海水淡化是解决淡水资源缺乏的重要途径^[1]。目前,在各种海水淡化方法中,多级闪蒸(MSF)占有主导地位。MSF技术成熟,造水规模约占世界的60%,特别适合热电厂进行水电联产^[2]。众所周知,水电联产能使能量得以充分的有效利用,因此多级闪蒸利用电厂汽轮机中做过功的蒸汽加热原料海水,达到“热尽其能”的目的^[3]。

如何将海水淡化装置与火力发电厂结合进行水电联产,进一步降低海水淡化成本以及实现能量的有效集成是有待解决的问题,逐渐成为世界各国研究的热点^[4-5]。M Cohen^[6]提出了利用电厂排放的冷却海水作为热源,实现水电联产。此项研究因为具有极低的蒸汽和电力消耗,使得产品水具有非常大的竞争力。Ali M El-Nashar^[7]通过采用电水比、燃料利用率等性能指标,针对6种水电联产方案从能量利用和技术上进行了分析,提出了实现水电联产需求匹配的方法和依据设备使用年限内成本最低的原则来选择最优的水电联产设计。

王金华等^[8]提出一种改进型的多级闪蒸海水淡化系统,并从理论上分析MSF-E系统的造水比、年均淡化水成本等经济性指标,结果表明在引出质量份额从0增加到理论最大值0.743时,造水比可提高42.6%,同时年均淡化水成本可以下降41.3%。

基于多级闪蒸与发电系统结合具有较大的吸引力,使得水电联产发展迅速,成为目前人们研究的热点。但是当前的研究大都局限于传统的多级闪蒸机构,对不同结构的多级闪蒸过程与发电系统的集成研究较少。基于此本文提出将贯通型(OTMSF)、带有盐水循环器(MMSF)、带有排热段(CMSF)^[9]的3种不同结构的多级闪蒸装置与发电系统进行集成,建立数学模型,并对集成系统进行优化设计,以期获得最佳的集成结构和工艺。

1 数学模型

图1、图2、图3所示分别为贯通型(OTMSF)、带有盐水循环器(MMSF)、带有排热段(CMSF)的3种多级闪蒸结构。多级闪蒸的每一级都包括蒸发室、淡水室、盐水预热器3部分。这3部分结构中,OTMSF结果最为简单。MMSF比OTMSF多了盐水混合器,可以利用排放浓盐水的热量,并且还可以减少海水的进料。而CMSF在MMSF的基础上增加了

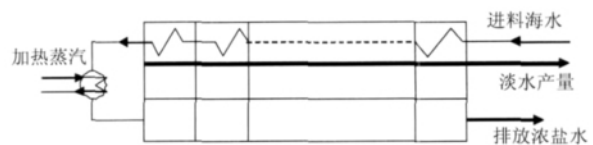


图1 贯通型多级闪蒸海水淡化结构图

Fig.1 Through multi stage flash desalination (OTMSF) structure

收稿日期 2010-10-14

基金项目 国家自然科学基金(20976173)

作者简介 伍联营(1971—),男,副教授,研究方向为化工系统工程,联系电话:13791914873,E-mail:wulianying@ouc.edu.cn

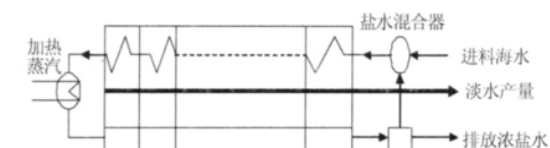


图 2 带有盐水循环器的多级闪海水淡化结构图

Fig.2 Brine circulator with multi-stage flash desalination (MMSF)

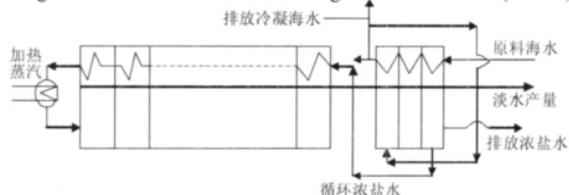


图 3 带有排热段的多级闪海水淡化结构图

Fig.3 Heat segment with the traditional multi-stage flash desalination (CMSF) structure

排热段,实现能量的有效利用。

本文针对 3 种结构各自的特点,分别于电厂进行集成,并依据能量平衡、物料平衡的关系建立水电联产系统数学模型(见图 4),同时考虑了以下因素:(1)忽略了闪蒸过程的非平衡损失;(2)盐水热熔等于海水,排热段、热回收段和盐水加热器的传热系数为常数;(3)选用的燃料为天然气,计算时采用甲烷的燃烧焓;(4)过程的热力学损失为常数;(5)假设动力循环的工作流体为水。

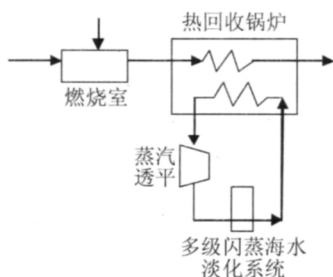


图 4 多级闪蒸海水淡化水电联产结构图

Fig.4 Multi-stage flash desalination water and electricity generation structure

此集成系统的过程如图 4 所示:甲烷进入通有空气的燃烧室中,燃烧产生大量的热,将燃烧后的高温气体通入热回收锅炉中,用于加热锅炉中的水,使其成为过热蒸汽;从热回收锅炉中产生的过热蒸汽进入蒸汽透平进行发电;发电后的蒸汽作为多级闪蒸的加热蒸汽,进行海水淡化。

1.1 贯通型多级闪蒸(OTMSF)水电联产模型

PR 是总的淡水产量与加热器所消耗的饱和水蒸气量之比,即造水比。 PR 是设计多级闪蒸装置的一个重要参数,同时也是海水淡化厂经济效益的直接体现。其定义如式(1):

$$PR = \frac{M_d}{M_s} = \frac{(n\Delta T_{st})\lambda_s}{(\Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + TTD_c)\lambda_v} \quad (1)$$

$$\frac{M_f}{M_d} = \frac{\lambda_v}{C_p(T_0 - T_n)} \quad (2)$$

式中 M_d 、 M_f 、 M_s 分别为淡水产量、进料海水流量和蒸汽流量, λ_v 、 λ_s 为水汽和过热蒸汽的凝结潜热, n 为多级闪蒸的级数, ΔT_{st} 为每一级的平均温差, ΔT_{loss} 为每一级的温差损失, TTD_c 为热回收段闪蒸后盐水出水温度与冷凝管盐水出口温度之差, C_p 为盐水热容。

物料衡算:

$$M_b = M_f - M_d \quad (3)$$

$$M_f X_f = M_b X_b \quad (4)$$

$$(LMDT)_c = \Delta T_{st} / \ln[(\Delta T_{st} + TTD_c) / (TTD_c)] \quad (5)$$

$$(LMDT)_h = \frac{\Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + TTD_c}{\ln[(TTD_h + \Delta T_{st} + \Delta T_{loss} + TTD_c) / (TTD_h)]} \quad (6)$$

式中 M_b 为排放浓盐水流量, X_f 、 X_b 分别为进料海水和排放浓盐水的浓度, $(LMDT)_c$ 和 $(LMDT)_h$ 分别表示盐水预热段和盐水加热段的对数平均温差, TTD_h 为盐水加热段的级间末端温差。

冷凝器和盐水加热器的面积计算公式如式(7)~式(8):

$$A_h = \frac{M_s \lambda_s}{U_h (LMTM)_h} \quad (7)$$

$$A_c = \frac{M_f C_p \Delta T_{st} M_d}{U_c (LMTD)_c} \quad (8)$$

$$\text{总面积的计算公式: } A = A_h + n A_c \quad (9)$$

式中 U_h 和 U_c 分别为盐水加热段和热回收段的总传热系数。

1.2 带有盐水循环器的多级闪蒸(MMSF)水电联产模型

总的物料衡算:

$$X_b M_b = 42000(M_b + M_d) \quad (10)$$

盐水循环器的物料衡算为:

$$M_f X_f = X_f M_f + X_n (M_f - M_f) \quad (11)$$

忽略掉最后一级热力学热量损失,简化原来的数学模型为:

$$M_f C_p (T_0 - T_1) = [X_b / (X_b - X_f)] M_d C_p (T_n - T_{cw}) \quad (12)$$

$$PR = \frac{T_0 - T_n}{T_0 - T_1} \quad (13)$$

$$\lambda_v (T_n - T_f) / (T_0 - T_n) = C_p [X_b / (X_b - X_f)] (T_n - T_{cw}) \quad (14)$$

式中 M_f 和 X_f 分别为盐水混合器出口的盐水流量和浓度, T_0 、 T_n 、 T_1 、 T_f 和 T_{cw} 分别为顶温、第 n 级闪蒸室、进入盐水加热器之前、进料海水和排放冷却海水的温度。

冷凝器和盐水加热器面积计算公式同式(5)~式(8)。

1.3 带有排热段的多级闪蒸(CMSF)水电联产模型

由于排热级多,消耗的热量多,使得热利用率低^[9],而理论和实践表明,排热段为3级较为适宜,故本文规定排热段的级数为3。此模型中热回收段的物料衡算和能量衡算计算方程同上,排热段的数学模型:

$$M_s \lambda_s = M_{cw} C_p (T_n - T_{cw}) + M_b C_p (T_n - T_{cw}) + M_d C_p (T_n - T_{cw}) \quad (15)$$

排热段面积:

$$A_j = (M_f + M_{cw}) C_p \Delta t_j / [U_j (LMTD)_j] \quad (16)$$

$$\text{总的面积为 } \Delta A = A_h + (n-j)A_c + jA_j \quad (17)$$

满足如下两个约束条件: $X_{n-j} = X_b$, $\Delta t_j = \Delta T_{st}$ 。

式中 U_j 、 $(LMTD)_j$ 、 Δt_j 分别为排热段的总的传热系数、对数平均温差和级间温差, M_{cw} 为排放冷却海水的流量。

1.4 多级闪蒸与水电联产集成模型

燃烧室中甲烷燃烧放出热量,加热水蒸气为过热水蒸气,而产生的过热蒸汽首先进入蒸汽透平发电,发电之后的水蒸气作为过热蒸汽用来进行多级闪蒸。本文采用压力为 100 kPa, 25 °C 时甲烷的摩尔燃烧焓为 890.31 kJ·mol⁻¹。

对于蒸汽透平模型中的焓值以及熵的计算,采用 Sergio Mussaati 等^[10]文献中的方法。此过程为过热蒸汽可逆绝热,等熵。

$$\text{发电量的计算公式: } W = \frac{D_h (h_0 - h_1) \eta_m \eta_g}{3600} \quad (18)$$

式中 D_h 为机组供热蒸汽量, h_0 为抽气焓, h_1 为排气焓, η_m 为机组机械效率, η_g 为电机效率。 η_m 、 η_g 一般取 99%。

1.5 系统优化模型

在本文中,选择的优化目标是集成系统的最大年经济效益 Max C_{tot} :

$$C_{tot} = C_w + C_{water} - (C_{boil} + C_s + C_c + C_{fuel} + C_{desalt}) \quad (19)$$

式中 C_{tot} 为年度集成系统的最大经济效益包括设备费用和操作费用, C_{boil} 、 C_s 、 C_c 、 C_{fuel} 、 C_{desalt} 、 C_w 和 C_{water} 分别为锅炉、蒸汽透平、冷凝器、燃料、多级闪蒸、电费和水的年度费用。费用计算采用文献[11]中的投资费用方程。本文中没有考虑海水的输送费用以及传热面上的结垢和材料腐蚀。约束条件包括能量衡算、物料衡算,见式(1)~式(17)。规定浓盐水的浓度不大于 70 000 mg·L⁻¹。

2 结果和讨论

本文对多级闪蒸过程于水电联产系统的进行模

拟和优化,所需的操作参数列于表 1。

表 1 3 种集成系统的操作参数

参 数	数 值
进料海水温度 /°C	30
进料海水浓度 /mg·L ⁻¹	42 000
顶温 /°C	90
排热段级数	3
盐水的平均热容 /kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	4.2
排放浓盐水温度 /°C	40
温差损失 ΔT_{loss} /°C	1
透平的等熵膨胀效率 /%	80
发电机组效率 /%	99
甲烷的燃烧值 (25 °C, 100 kPa) /kJ·mol ⁻¹	890.31

2.1 闪蒸级数的影响

在考虑级数影响时,为了计算的简单,仅取淡水流量 $M_d = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。改变闪蒸级数时,主要考察 3 种水电集成系统的经济效益及发电量随级数的变化规律,模拟结果如图 5、图 6 所示。

从图 5 中可以看出,随着级数的增加,总的经济效益均是先升高后降低,在级数达到一定值后目标函数开始下降,且随着级数的增大其变化逐步趋于稳定。原因为当级数较少时,随着级数增加,系统的设备投资费用会相应增大;但系统的 PR 造水比即性能比增大,蒸汽消耗量降低,减少了操作费用,两者的综合作用是总经济效益上升。但当级数增大到一定值再继续增大时,设备投资的投资费用在总费用中的作用高于操作费用,起到主导的作用,两者综合的结果是总的经济效益又出现下降。本文取 $M_d = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,属于利用废热的小型装置,级间温差可以大于 6 °C,所以级数在 6~10 范围之内,出现经济效益最大也是合理的。在 $n=8$ 以后贯通型的经济效益高于带有排热段的传统的多级闪蒸结构。

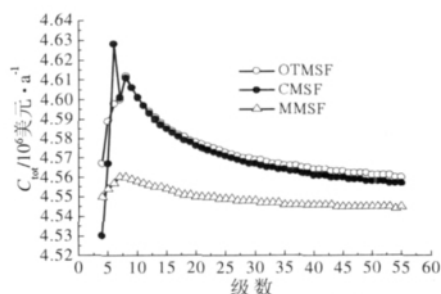


图 5 3 种多级闪蒸水电联产系统的经济效益随级数的变化曲线

Fig.5 Three multi-stage flash systems, the economic benefits of hydropower generation changes with the progression of the curve

由图 6 可以看出,3 种多级闪蒸海水淡化的水电集成系统都出现电量下降的趋势,并且贯通型和带有排热段结构的电量变化几乎相等。原因是产水

量不变,随着级数增加,能量的消耗减少,从而使得燃料的用量也在减少,产生的蒸汽量减少。蒸汽量减少了,从蒸汽透平中发的电量相应的也会减少。

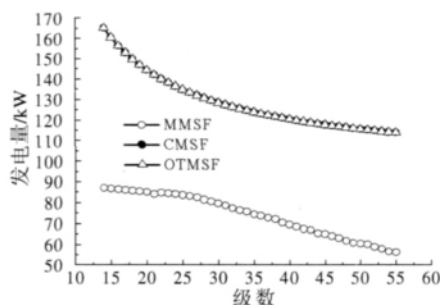


图 6 3 种多级闪蒸水电联产系统发电量随级数的曲线

Fig.6 Three multi-stage flash system generating capacity of hydropower generation curve with the series

2.2 产水量的影响

采用表 1 中操作参数,改变淡水产量从 $1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 到 $120 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,规定这 3 种集成系统的级数都为 30,产水量对经济效益的影响如表 2 所示。

表 2 总经济效益计算
Tab.2 Calculated the total economic benefit

$M_d/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	$C_{\text{tot}}/10^6 \text{ 美元} \cdot \text{a}^{-1}$		
	OTMSF	MMSF	CMSF
1	4.57	4.55	4.57
10	54.36	50.36	54.33
20	109.70	93.36	109.60
30	165.00	127.80	164.90
40	220.30	153.70	220.20
50	275.70	168.00	275.50
60	331.00	181.50	330.90
70	386.30	179.00	386.20
80	441.70	172.60	441.50
90	497.00	156.20	496.80
100	552.30	129.70	552.10
110	607.70	96.06	607.30
120	663.00	53.88	662.70

从表 2 中可以看出,在产水量变化的条件下,随着产水量 M_d 的增大,OTMSF 和 CMSF 的总效益均随之增大,且始终高于 MMSF 的总经济效益。OTMSF 的总经济效益总是略高于 CMSF,从而表明 OTMSF 更加适合日产淡水千吨的装置。而 MMSF 结构的总效益出现先增大后下降的趋势,且在 $M_d=60 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时,总经济效益达到最大。

3 结 论

研究了 3 种不同结构的多级闪蒸与发电系统集成,建立了水电联产系统的数学模型,以最大的年经济效益为目标进行优化,采用 GAMS 软件进行求解。结果表明:(1)在相同的产水量的情况下,级数的增加对总经济效益的影响是先增大后减少,即存在一个级数的最优值,使得经济效益最大。但 3 种集成系统的发电量均随着级数的增加而减少,并且 MMSF 的发电量总是低于其它两种;(2)改变淡水产量时,OTMSF 的总经济效益略大于 CMSF 和 MMSF,而 MMSF 结构的总经济效益呈现先增大后下降的趋势,且在 $M_d=60 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,总经济效益达到最大。3 种结构比较,OTMSF 结构最优,CMSF 优于 MMSF 结构,说明 OTMSF 与其它两种结构相比,与电厂集成时更占优势。

参考文献:

- [1] 伍联营,肖胜楠,孙圣楠,等.多级闪蒸海水淡化系统的优化设计[J].华东理工大学学报:自然科学版,2009,4(35):535-538.
- [2] 严俊杰,王金华,邵树峰,等.多级闪蒸海水淡化系统的改进研究[J].西安交通大学学报,2005,39(11):1165-1168.
- [3] 严俊杰,黄锦涛,何茂刚,等.冷热电联产技术[M].北京:化学工业出版社,2006:34-36.
- [4] 高从塔,陈国华.海水淡化技术与工程手册[M].北京:化学工业出版社,2004:55-62.
- [5] 王世昌.海水淡化工程[M].北京:化学工业出版社,2003:8-14.
- [6] M Cohen. Power plant residual heat for seawater desalination [J]. Desalination, 2002,152:155-165.
- [7] Ali M El-Nashar. Cogeneration for power and desalination - state of the art view[J].Desalination,2001,134:7-28.
- [8] 王金华,胡党辉,严俊杰,等.改进型多级闪蒸海水淡化系统的经济性分析[J].动力工程,2007,27(1):149-152.
- [9] Hisham El-Dessouky, Imad Alatiqi, Hisham Ettouney. Process synthesis: the multi-stage flash desalination system[J].Desalination, 1998,115:155-179.
- [10] Sergio Mussati,Pio Aguirre,Nicolas Scenna.Dual-purpose desalination plants.Part .optimal design [J].Desalination,2002,153: 179-184.
- [11] BFernanndez, FCastells, Grossmann. A rigorous MINLP model for the optimal synthesis and operation of utility plants [J].Trans IChemE,1998,76(A):246-259.

(下转第 69 页)

个人带动家庭 家庭带动社会
人人参与节能减排

测,用实测值对 RSM 预测 COD 去除率的准确性进行检验,结果见表 5。

表 5 COD 去除率的最优覆盖图预测值与试验值对比

Tab.5 Optimum response results from overlay plot and laboratory

点号	COD去除率 /%		点号	COD去除率 /%	
	RSM预测	实测		RSM预测	实测
1	86.59	82.74	4	86.90	88.27
2	89.52	91.33	5	89.29	85.39
3	91.38	95.84	6	92.96	94.66

由表 5 可见,预测值和实测值相差不大,差值在 5 个百分点之内,表明 RSM 最优化预测准确性很高,对试验和实际工艺操作有很理想的指导作用。

4 结 论

对生化出水水质变化大、可生化性差、难处理等特点,电解氧化法可高效对其深度处理。二段 SBBR 生化出水 COD 为 $1\,400\sim 2\,300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,采用图解最优化技术分析,要求 COD 去除率达到 85%~95%时,当 COD 为 $1\,400\sim 1\,850\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,选择电解时间 2~

2.5 h 或 $\rho(\text{Cl}^-)$ 为 $0\sim 2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 可达到目标;当 COD 为 $1\,850\sim 2\,300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,则选择电解时间 2.5~4 h 或 $\rho(\text{Cl}^-)$ 为 $2\,000\sim 4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 可达到目标。因此可针对不同进水 COD,选择合适的电解时间或添加 Cl^- 的量对其进行有效去除,实现电解处理效果和济成本有效平衡。

参考文献:

- [1] 张正安,黄飞. 垃圾填埋渗滤液的环境污染与处理[J]. 污染防治技术, 2009,22(1): 40-43.
- [2] Genders D J, Weinberg N. Electrochemistry for a cleaner environment [M]. New York: Electrosynthesis Company Inc.,1992: 6-14.
- [3] Mason R L, Gunst R F, Hess J J. Statistical design and analysis of experiments with applications to engineering and science[M]. London: John Wiley and Sons Inc.,2003:600-610.
- [4] 蔡永益,许莉. 电解氧化法与纳滤工艺耦合处理十三碳二元酸废水的研究[D]. 天津:天津大学, 2007:22-24.
- [5] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.

STUDY ON ELECTROLYTIC OXIDATION ADVANCED TREATMENT THE MATURE LANDFILL LEACHATE

Qi Lihua, Zhang Zhi, Zu Shiqing

(Key Laboratory of the Three-gorge Reservoir Region's Eco-Environment, Department of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Using electrolytic oxidation advanced treated the biological effluent water that the two steps SBBR dispose the mature landfill leachate. Due to the biological water quality were large fluctuations, using response surface methodology to design experiment of electrolytic oxidation, obtaining the COD removal efficiency model and optimization the test results. The results showed that, required the COD removal was 85%~95%, when the COD concentration was $1\,400\sim 1\,850\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, selecting the electrolysis time of 2~2.5 h or external Cl^- concentration of $0\sim 2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to achieve the target; when the COD concentration was $1\,850\sim 2\,300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, selecting the electrolysis time of 2.5~4 h or external Cl^- concentration of $2\,000\sim 4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to achieve the target. From the conservation of power consumption, saving dosage (plus Cl^-), and electrolysis effect were analyzed, in order to achieve the cost-effective removal and economic balance.

Keywords: landfill leachate; electrolytic oxidation; RSM; optimization

(上接第 60 页)

SIMULATION AND OPTIMIZATION OF MULTI-STAGE FLASH DESALINATION OF COMBINED WATER AND ELECTRICITY PRODUCTION

Wu Lianying, Wang Huimin, Hu Yangdong, Gao congjie

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The technology of seawater desalination has become an effective method for solving the shortage of the world freshwater resources. The co-generation integrated mathematical model is being presented based on three different MSF (Multi-stage flash, MSF) desalination plants once-through MSF(OTMSF), mixer brine recycle MSF(MMSF) and MSF with a heat rejection section(CMSF) which are combined with water and electricity. The objective of the mathematical model is to maximum the total economic benefits of the integrated system based on the three mathematical model above and discussion the effect of the operating and structure parameters on the performance of the system. The results showed that the economic benefit of the three integrated structures reaches the maximum when the series reach a certain value. With increase of the water production(M_d), the economic benefits of the three integrated increase, but when the M_d reaches a certain value, the economic benefits of the CMSF is higher than the OTMSF; while the economic benefits of the MMSF is significantly lower than the other two, trend then decreased.

Keywords: MSF; water and electricity; simulation; optimization; integration