KIGAS Vol. 20, No. 1, pp 7~12, 2016
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2016.20.1.7

가스전의 추출속도를 고려한 C3MR 공정의 동력기 선택전략

이선규 · 이인규* · 탁경재* · †문 일*
한국가스안전공사 가스안전연구원, 연세대학교 화공생명공학과*
(2015년 11월 25일 접수, 2016년 2월 22일 수정, 2016년 2월 23일 채택)

Strategy of Driver Selection in C3MR Process Considering Extraction Rate from Natural Gas Well

Sunkyu Lee · Inkyu Lee* · Kyungjae Tak* · †Il Moon*
Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation (KGS), 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun,Chungcheongbuk-do 369-810, Republic of Korea
*Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea**
(Received November 25, 2015; Revised February 22, 2016; Accepted February 23, 2016)

요 약

천연가스는 장거리 수송을 위해서는 액화가 필수적으로 이루어진다. 액화공정 내 압축기에서 특히 많은 동력이 요구되며, 동력을 공급하기 위해서는 동력기가 필요하다. 여러 가지 동력기 중 어떠한 동력기를 선택하느냐에 따라 동력 공급에 필요한 비용이 변하게 된다. 본 연구에서는 최소의 비용으로 천연가스 액화공정에 동력을 공급하는 최적의 동력기 선택을 위해 최적화를 수행하였다. 또한 가스전의 용량을 고려하여 일정한 가스전에서 천연가스가 추출부터 소멸될 때까지의 전체기간 동안에 추출되는 속도가 변경되는 시나리오를 구성하였다. 공정모사를 통해 동력기 장치의 비용과 운전비용 간의 상관관계를 예측하였으며, 장치의 수명 등을 고려하여 모델링하였다. 그 결과 최대 6.4%의 비용을 감소하는 최적의 동력기 모델을 설계하였다.

Abstract - Natural gas liquefaction process is essential to transport natural gas for long distances. Lots of compressors in this process are needed and the energy for these compressors can be supplied by drivers. Total driver cost can be changed by selecting various drivers. This study focused on the minimization of the driver cost to provide the energy to the compressors. Moreover, scenarios, extracting velocity is changed during whole operating period, are set with considering gas well capacity. The mathematical model was established by considering trade off relationship between the capital cost and the operating cost of the turbines. The model also considers the life time of the driver equipments. As the result, the driver cost of the optimized case was reduced by 6.4% than the base case.

Key words : liquefied natural gas, driver selection, cost optimization, gas turbine, extraction rate

I. 서 론

전통적인 화석연료는 국가적인 차원에서 환경 제재가 증가할수록 사용하기 어려워지고 있다. 이에 사회적, 지리적, 경제적 요인을 극복할 대안이 필요하며 천연가스(natural gas, NG)가 그 대안으로 가장 많이 부각되고 있다[1][2]. 실제로 액화천연가스 사용량은 2006년부터 2011년까지 연 평균 0.9~1.6% 증가하고 있으며 향후 원유와 천연가스 간의 시장구조 변화로 인해 천연가스의 사용량은 더 증가할 것으로 예상된다[3][4]. 천연가스를 약 -160℃로 냉각하게 되면 액화되어 부피가 약 1/600로 감소하기 때문에 천연가스의 시장규모가 커질수록 장거리에 있는

†Corresponding author:ilmoon@yonsei.ac.kr
Copyright ⓒ 2016 by The Korean Institute of Gas

국가로 대량의 가스를 수송할 수 있는 액화공정의 중요성은 더 높아진다[5][6].

천연가스 액화공정은 극저온에서 운전되는 특성 때문에 많은 에너지를 필요로 한다. 압축 팽창을 원리로 하는 천연가스 액화공정은 대부분의 에너지를 압축기에서 소모한다. 따라서 압축기의 에너지 소모량을 최소화하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 공정 자체의 에너지 효율 뿐 아니라 에너지를 공급하는 동력기 선택 또한 비용적인 측면에서 중요하다. 따라서 본 연구에서는 최소의 비용으로 천연가스 액화공정에 동력을 공급하는 동력기 선택 최적화 모델을 제안하였다. 대상공정으로는 가장 널리 상용화되어 있는 천연가스 액화공정인 APCI (Air Product and Chemicals, Inc.)사의 C3MR (Propane Precooled Mixed Refrigerant) 공정을 선택하였으며, 공정 모사를 통해 천연가스 액화 용량에 따라 필요한 동력의 양을 계산하였다. 또한 가스전의 추출 속도를 고려하여 기간에 따라 각기 다른 최적의 운전조건을 찾아내도록 최적화를 수행하였다.

Ⅱ. C3MR 공정의 구성

대상공정은 APCI사의 C3MR공정으로 이의 모식도를 Fig. 1.에 나타내었다.

C3MR 액화공정은 두 개의 냉각 사이클로 이루어지며 프로판에 의한 예비냉각 단계와 혼합냉매에 의한 액화공정 단계로 나누어진다. 먼저 기체 상태의 냉매가 압축기를 통해 고압의 상태가 된다. 이후 열교환기에 의한 냉각으로 냉매가 액화되며, 고압의 액상 냉매의 온도는 밸브 팽창에 의해 더욱 낮아지게 된다. 이 냉매는 천연가스 또는 다른 냉매를 냉각시키면서 기화된다[7]. 본 연구에서 대상으로 한 공정은 프로판에 의한 예비냉각 단계에서는 4개의 압축기를 사용하여 압축하였고, 혼합냉매에 의한 액화단계에서는 3단 압축을 위해 3개의 압축기를 사용하였다.

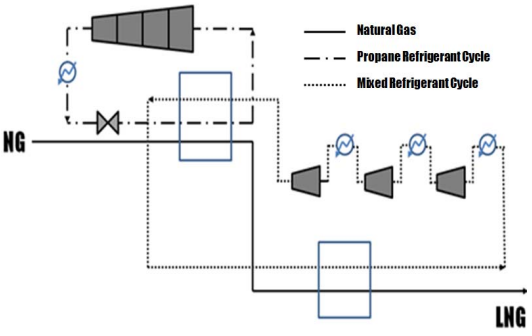

Fig. 1. Schematic flow sheet of C3MR process.

Ⅲ. 설계 모사

3.1 공정 모사

먼저 가스전이 폐쇄될 때까지의 필요한 동력의 양을 계산하기 위해 천연가스를 액화하는 유량에 따라 필요한 동력의 양을 비교하였다. 상용급 5MTPA급의 C3MR 플랜트를 Aspen HYSYS v8.0을 통해 모사하였으며 이를 Fig.2 에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 C3MR 공정의 냉매와 천연가스는 Peng Robinson 상태방정식에 맞추어 열역학적으로 거동한다. 또한 액화공정을 통해 가스전으로부터 추출한 양의 85%가 액화되며 열교환기 내에서 최소온도차는 5℃로 설정하였다. 공정 모사에 사용된 천연가스 및 혼합냉매의 온도, 압력, 유량을 Table 1에 나타내었다.

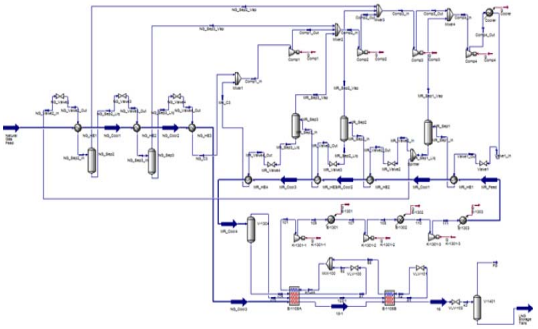

Fig. 2. Simulation flow sheet of C3MR process.

Table 1. Inlet and Outlet Conditions of natural gas and mixed refrigerant

	NG	After cooling	LNG
Temperature (℃)	15.00	-33.34	-159.30
Pressure (kPa)	6260	6170	150
Composition (% mass faction)			
Nitrogen	4.5	4.5	1.3
Methane	86.9	86.9	89.2
Ethane	5.1	5.1	6.0

3.2 플랜트 용량에 따른 에너지 소모량

현재 건설되어 작동중인 플랜트의 용량을 고려하여 3MTPA부터 4MTPA, 5MTPA, 6MTPA, 7MTPA까지 총 다섯 가지의 경우에 대해서 공정모사를 하였으며 용량별 C3MR공정의 에너지 소모량을 계산하였다. 각 용량별 압축기에서 필요한 에너지 소모량을 Table 2에 나타내었으며 이때 프로판에 의한 예비냉각단계에서는 하나의 축류압축기로 3단압축을 하는 것을 고려하여 필요한 동력의 양을 합산하여 나타내었다. 공정 모사는 열역학적으로 수행되었기 때문에 액화 천연가스의 연간 생산량이 증가할수록 필요한 냉매의 유량은 증가하고 압축기에서 필요로 하는 동력의 양 또한 선형적으로 증가하게 된다.

Table 2. Energy consumption of compressors in various capacity of C3MR process

	3 MTPA	4 MTPA	5 MTPA	6 MTPA	7 MTPA
Propane compressor (MW)	34.5	45.9	57.6	68.9	80.4
MR compressor1 (MW)	38.1	50.8	63.4	76.1	88.8
MR compressor2 (MW)	16.6	22.2	27.7	33.3	38.8
MR compressor3 (MW)	15.5	20.7	25.9	31.0	36.2
Total(MW)	104.7	139.6	174.6	209.3	244.2

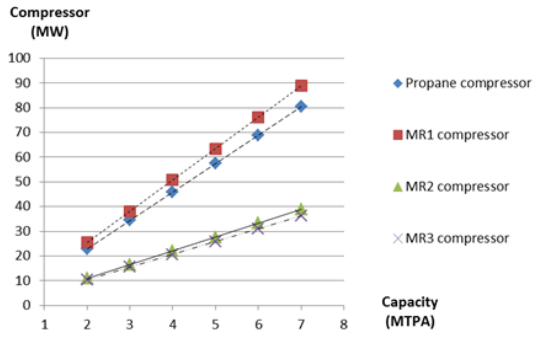

Fig. 3. Relation between plant capacity and energy consumption of compressors.

이와 같은 형태를 통해 선형관계식을 도출하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다.

3.3 동력기 선택 모델

냉매 사이클 모사를 통해 유량과 압축기 사이의 관계식을 확인하였다. 본 연구에서는 총 120MT(million tons)의 가스가 매장되어 있는 가스전에 대해서 현재 운전 중인 액화플랜트의 용량을 고려하여 연평균 5백만 톤의 가스를 추출 및 액화한다고 가정하였다. 액화공정이 가동 시부터 폐쇄 시까지의 전체 기간 동안 압축기에서 소모되는 동력을 충족하고 최소의 비용을 지출하는 최적의 동력 공급 장치 선택 모델을 구성하였다. 최적화 모델 작성을 위해 MINLP (Mixed Integer Non-linear Programming)기법을 사용하였다. 동력 공급 장치 선택 모델은 가스터빈과 헬퍼모터로 구성하였으며 가스터빈은 GE사, KWU 등에서 제조한 총 32가지 터빈 유형을 2개 이하로 사용하였다. 또한 헬퍼모터를 이용하여 초기단계 또는 긴급한 경우에 동력을 공급하였다. 가스터빈의 수명은 일반적으로 100,000~160,000 시간으로 알려져 있다[8]. 이를 환산하면 12년에서 20년 정도 사용 후 교체가 이루어지게 되는데 이 중 가장 좋지 않은 조건인 12년에 한번 씩 교체하는 것으로 가정하였다. 추가적인 동력 공급 장치 선택 모델의 제약조건을 Table 3에 나타내었다.

목적함수는 총 기간 동안 설치비용과 운전비용의 합이 최소가 되는 것으로 설정하였으며 이를 식(1)에 나타내었다. 헬퍼모터의 사용시기와 터빈의 수명을 고려하여 구간을 결정하여 계산식을 형성하였다. 터빈 교체 전을 구간 1, 교체 후 헬퍼모터와 함께 압축기에 에너지를 공급하는 기간은 구간 2, 교체터빈으로 에너지를 공급하는 기간을 구간 3으로 분류하였다.

$$\text{Min. } TC = CC + OC_1 + OC_2 + OC_3 \qquad (1)$$

구간 별 설치비용 및 운전비용에 대한 수식을 식(2)~식(5)에 나타내었다.

Table 3. Constraints of C3MR process

Maximum helper motor capacity(mw)	40
Mechanical transmission loss(%)	1.5
Plant life(years)	24
Gas Turbine life(years)	12

$$CC = \sum_i (Y_1(i) * C_T(i) * N_{T1} + Y_2(i) * C_T(i) * N_{T2}) + C_{HM} * N_{HM} \quad (2)$$

$$OC_1 = \sum_i Y_1(i) * UO_t(i) * (P_{T11}+P_{T21}) \quad (3)$$

$$OC_2 = \sum_i Y_2(i) * UO_t(i) * (P_{T12}+P_{T22}) + O_{HM} * (P_{HM12}+P_{HM22}) \quad (4)$$

$$OC_3 = \sum_i Y_2(i) * UO_t(i) * (P_{T11}+P_{T21}) \quad (5)$$

교체 전 압축기에서 필요한 동력의 양을 식(6)과 식(7)에 나타내었으며, 교체 후 압축기에서 필요한 동력의 양을 식(8) ~ (11)에 나타내었다.

$$\sum_l C_1(l)+C_3(l) \le P_{T11} * T_1 * (1-L_{mech}) \quad (6)$$

$$\sum_l C_2(l)+C_4(l) \le P_{T21} * T_1 * (1-L_{mech}) \quad (7)$$

$$\sum_l C_1(l)+C_3(l) \le (P_{T12}+P_{HM12}) * T_2 * (1-L_{mech}) \quad (8)$$

$$\sum_l C_2(l)+C_4(l) \le (P_{T22}+P_{HM22}) * T_2 * (1-L_{mech}) \quad (9)$$

$$\sum_l C_1(l)+C_3(l) \le P_{T13} * T_3 * (1-L_{mech}) \quad (10)$$

$$\sum_l C_2(l)+C_4(l) \le P_{T23} * T_3 * (1-L_{mech}) \quad (11)$$

터빈의 유형은 동일한 유형의 터빈을 중복하여 사용되며 식 (12)와 식(13)에 나타내었다.

$$\sum_i (Y_1(i)) = 1 \quad (12)$$

$$\sum_i (Y_2(i)) = 1 \quad (13)$$

터빈 동력의 공급양과 헬퍼모터는 최대 출력보다 낮은 양을 가진다. 터빈의 제약조건은 식(14) ~ 식(19)에 나타내었으며, 헬퍼모터의 제약조건은 식 (20), (21)에 나타내었다.

$$\sum_i Y_1(i) * P_{T1MAX} - P_{T11} \ge 0 \quad (14)$$

$$\sum_i Y_1(i) * P_{T1MAX} - P_{T21} \ge 0 \quad (15)$$

$$\sum_i Y_2(i) * P_{T2MAX} - P_{T22} \ge 0 \quad (16)$$

$$\sum_i Y_2(i) * P_{T2MAX} - P_{T22} \ge 0 \quad (17)$$

$$\sum_i Y_2(i) * P_{T2MAX} - P_{T23} \ge 0 \quad (18)$$

$$\sum_i Y_2(i) * P_{T2MAX} - P_{T23} \ge 0 \quad (19)$$

$$P_{HM12} - X_{HMmax} \le 0 \quad (20)$$

$$P_{HM22} - X_{HMmax} \le 0 \quad (21)$$

3.4 추출속도를 고려한 동력기 선택 전략

일반적으로 가스전에서 천연가스를 추출 할 때 시간에 따라 추출량을 다르게 추출한다. 이는 가스전이 천연가스로 가득 차 있을 때와 그렇지 않을 때의 가스 전 내 압력이 다르기 때문이다. 이를 반영하여 추출속도를 고려하기 위해 3가지 시나리오를 선정하였다. Case 1은 급격하게 추출속도가 변화하는 경우이며 Case 3로 갈수록 추출속도의 변화량이 적어지는 시나리오이다. 현재 작동중인 플랜트의 용량

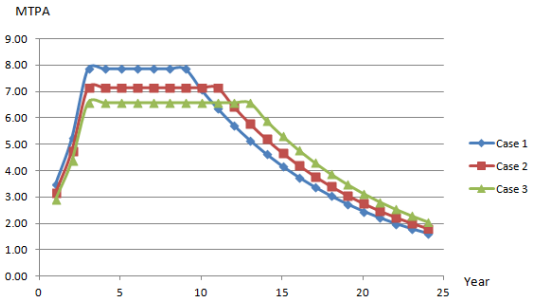

Fig. 4. Three scenarios for case study.

을 고려하여 연간액화량이 8백만톤을 넘지 않게 시나리오를 구성하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 각각의 시나리오에 대해 동력기 용량 최적화와 압축기와 동력기의 연결구조 최적화를 각각 수행하였다.

동력기 용량 최적화는 터빈과 압축기 사이의 축을 그대로 유지하는 방식이다. 그러나 터빈의 유형은 필요한 양에 따라 다른 유형의 터빈으로 교체하여 동력을 공급한다. 이 경우에는 동일한 터빈으로 교체할 시 낭비될 수 있는 동력을 최소화하여 운전비용과 장치 비용을 줄일 수 있다. 또한 축을 이동시키지 않으므로 안정적인 공정 운영이 가능하다.

압축기와 동력기의 연결구조 최적화는 필요한 동력을 공급하기 위해 교체 전에는 대형 터빈 2개로 동력을 공급하고 교체 후에는 대형 터빈 1개와 헬퍼모터를 이용하여 동력을 공급하는 방식이다. 즉 터빈 교체 후에 1개의 터빈이 4개의 압축기에 동력을 공급하게 된다. 이 경우에는 압축기와 터빈의 연결하는 축이 변경되므로 공정의 안정성은 떨어질 수 있으나 비용을 줄일 수 있다.

Ⅳ. 모사 결과 및 고찰

필요한 양에 따라 다른 유형의 터빈으로 교체하여 동력을 공급하는 방식을 통해 동일한 터빈으로 교체할 시 낭비할 수 있는 동력을 최소화하여 운전비용과 장치비용을 줄일 수 있다. 또한 교체 시 여러 개의 터빈을 대체 할 수 있는 대형 터빈으로 교체함으로써 장치의 비용을 감소시킬 수 있다.

동력기 용량 최적화는 초기에 2개의 중형터빈을 사용하여 압축기에 동력을 공급하며, 터빈의 수명이 끝난 뒤에도 또 다른 2개의 중형터빈으로 교체해 동력을 공급하는 경우를 최적화 하였다. 추출 및 액화하는 유량이 급격하게 증가 및 감소하는 Case 1의 경우에는 동일한 수량의 적합한 터빈으로 교체하였

Table 4. Driver capacity optimization result

Extraction scenario		Case 1	Case 2	Case 3
Configuration	Term 1	(Turbine A) + (Turbine A)		
	Term 2	(Turbine B) + (Turbine B) + (Helper motor)		
	Term 3	(Turbine B) + (Turbine B)		
CAPEX(million $)		103.71	109.31	129.51
OPEX(million $)		840.01	817.65	787.11
Total cost(million $)		943.71	926.96	916.62

Table 5. Driver connection optimization result

Extraction scenario		Case 1	Case 2	Case 3
Configuration	Term 1	(Turbine A) + (Turbine A)		
	Term 2	(Turbine B) + (Helper motor)		
	Term 3	(Turbine B)		
CAPEX(million $)		96.95	104.65	104.30
OPEX(million $)		786.34	781.59	783.54
Total cost(million $)		883.29	886.24	887.84

음에도 $943,710,000의 동력기 비용이 필요하다. 반면에 상대적으로 액화 유량의 변화가 적은 Case 3의 경우에는 $916,620,000의 동력기 비용이 필요하다. 이는 장기적으로 일정하게 추출하여 액화하는 경우 적합한 터빈의 유형으로 교체함으로써 많은 비용을 줄이는 것을 확인하였다. 각각의 시나리오에 대한 동력기 용량 최적화 결과를 Table 4에 나타내었다.

압축기와 동력기의 연결구조 최적화는 초기에 2개의 중형터빈을 사용하여 동력을 공급하며 터빈의 수명이 끝난 후 교체 시 1개의 대형 터빈으로 교체하여 압축기에 동력을 공급하는 경우를 최적화 하였다. 이 경우에는 반대로 급격하게 액화 유량을 변화하는 Case 3의 경우에는 $883,290,000의 비용이 지출되지만 유량변화가 적은 Case 1의 경우에 $887,840,000으로 보다 적은 비용이 지출됨을 확인할 수 있었다. 이는 두 개의 중형터빈을 대체 할 수 있는 한 개의 대형터빈 설치로 설치비용 상승과 운전비용의 감소가 상쇄됨으로써 이와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 각각의 시나리오에 대한 압축기와 동력기의 연결구조 최적화 결과를 Table 5에 나타내었다.

결론적으로, Case 1의 추출속도로 천연가스를 시추 할 때, 압축기와 동력기의 연결구조를 최적화하는 경우 가장 최소의 비용으로 천연가스 액화공정에 동력을 공급 할 수 있었다. 이는 가장 비용이 많이 소모되는 Case 1의 추출속도로 천연가스를 시추 할 때, 동력기 용량 최적화를 수행한 경우 보다 약 6.4% 적은 비용으로 전체 가스전의 추출 및 액화를 수행할 수 있는 수치이다.

V. 결 론

본 연구에서는 동일한 용량의 가스전에 대하여장기적인 측면에서 비용을 최소화 할 수 있는 동력 공급 장치 선택 모델을 개발하였다. 이를 위해 다른 속도로 천연가스를 추출하여 액화하는 세 가지 추출속도 시나리오를 설정하였다. 또한 상용 공정 모사 프로그램을 통해 대상공정인 C3MR 공정의 시뮬레이션을 수행하였고 이를 통해 얻은 압축기의 에너지 소모량을 기반으로 최적화 모델링을 수행하였다. 최적화 모델은 동력기 용량 최적화와 압축기와 동력기의 연결구조 최적화, 두 가지의 모델을 개발하였다. 각각의 모델은 터빈 교체 시 같은 개수의 터빈으로 교체하는 경우와 다른 개수의 터빈으로 교체하는 경우를 나타낸다. 두 모델 모두 목적함수는 설치비용과 운전비용의 최소화이다. 각각의 시나리오에 따라 두 가지 최적화를 모두 수행한 결과 천연가스를 추출 및 액화하는 양이 급격하게 변화할 때 같은 개수의 터빈으로 교체하는 경우보다 하나의 대형터빈으로 교체하는 경우가 약 6.4%의 비용으로 감소되는 것을 확인하였다. 천연가스를 추출하여 액화하는 과정과 터빈의 수명이 정상적으로 작동될 때 비용적인 측면에서 적절한 동력기 조합을 최적화하였다. 본 연구를 통해 구축된 모델과 연구결과는 천연가스 액화용량에 따른 동력 공급 장치 선택에 중요한 역할을 할 수 있을 것이며, 현재 개발 중인 액화공정의 국내 자체 기술에 대해서 경제성을 향상시키는 것에 기여할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 가스플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

사용기호

i : Turbine type
k : Order of compressors
l : Year of Extraction
j : Term supplied by turbine configuration
$T_{(j)}$: Period of Term j
$C_{(K)}$: Compressor energy k in Cycle
L_{mech} : Mechanical loss for transmission
X_{HMmax} : Maximum capacity of helper motor
Y_1 : Turbine type before substitution
Y_2 : Turbine type after substitution
TC : Total cost
CC : Capital cost
$C_{T(i)}$: Capital cost of turbine
C_{HM} : Capital cost of helpter motor
N_{T1} : Number of turbine before substitution
N_{T2} : Number of turbine after substitution
N_{HM} : Number of helper motor
$OC_{(j)}$: Operating cost of term j
$O_{T(i)}$: Operating cost of turbine i
$UO_{T(i)}$: Operating cost to supply unit energy about turbine i
O_{HM} : Operating cost of helper motor
O_{HM} : Operating cost of helper motor
$P_{T(1,j)}$: Supply energy by first turbine for term j
$P_{T(2,j)}$: Supply energy by Second turbine for term j
P_{HM12} : Supply energy by first helper motor
P_{HM22} : Supply energy by Second helper motor
P_{T1MAX} : Maximum energy of first turbine
P_{T2MAX} : Maximum energy of Second turbine
O_{HM} : Operating cost of helper motor

REFERENCES

[1] Tak, K. J., Lim, W. S., Ko, D. H., Choi, K. H., Moon, I., "Optimization of Mixed Refrigerant System in LNG Liquefaction", May 30, *ESCAPE 21*, (2011)

[2] Lim, W. S., Choi, K. H., and Moon, I., "Current Status and Perspectives of Liquefied Natural gas(LNG) Plant Design", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(9) (2013)

[3] International Energy Outlook 2013, *U.S Energy Information Administration(EIA)*, (2013)

[4] Samantha azzarello, Market Insight, *CME group*, (2014)

[5] L. Castillo, M. Majzoub Dahouk, S. Di Scipio, and C.A Dorao, "Conceptual analysis of the precooling stage for LNG processes", *Energy Conversion and management*, 66, 41-47,(2013)

[6] Lee, I. K., Tak, K. J., Lim, W. S., and Moon, I., Kim, J. S., Choi, K. H., "Analysis of Pure Refrigerant Cycle Design on C3MR Process through Driver Selection", *Journal of the Korean Institute of gas*, 17(3), (2013)

[7] Lee, I. K., Tak, K. J., Lim, W. S., and Moon, I., "Case studiesforoptimizing energy efficiency of propane cycle pressure level on C3MR process", *Journal of the Korean Institute of gas*, 15(6) 38-43, (2011)

[8] Pontus Slottner, "life extenstion of SIMENS industrial sized gas turbines", *18th symposium of the industrial application of gas turbines committee*, (2009)