

PSO를 이용한 물 재이용 펌프시스템의 에너지 비용 제어

부창진¹, 김호찬², 강민재^{*}

¹제주국제대학교 전기에너지공학과, ²제주대학교 전기공학과

Energy Cost Saving Control of Water Reuse Pumping System Using Particle Swarm Optimization

Chang-Jin Boo¹, Ho-Chan Kim², Min-Jae Kang^{*}

¹Department of Electrical Energy Eng., Jeju International University

²Department of Electrical Engineering, Jeju National University

요약 본 논문은 PSO 알고리즘을 이용하여 물 재이용 펌프 시스템의 에너지비용을 최소화 할 수 있는 방법을 제안한다. 1시간 단위의 시간대에서 펌프제어를 위해 계시별 요금제를 기반으로 하여 최적화 구간을 설정하고 PSO알고리즘을 이용하여 에너지 비용을 절감할 수 있도록 펌프동작을 제어한다. 물 재이용 펌프시스템에서 고정된 유량을 출력하는 펌프와 입력 전력을 가변할 수 있는 펌프에 대해 TOU 기반에서 에너지 비용을 최대로 줄일 수 있도록 시스템을 동작시킨다. 시뮬레이션을 통해 제안한 에너지 비용 절감 방법이 기존 수위기반의 제어방법보다 비용을 절감할 수 있음을 확인할 수 있다.

Abstract This paper presents a control method for energy cost saving in the water reuse pumping system. An optimize horizon switching strategy is proposed to implement an pump control. And Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is used to solve optimal problems in each time step. Energy costs are calculated for electricity on both TOU in the light, heavy, and maximum load time period and peak charges. The control method in water reuse pumping systems is determined to reduce the TOU cost. The simulation results show a energy cost saving for water reuse pumping systems.

Key Words : Pump switching, energy cost saving, optimal control, PSO, demand side management

1. 서론

전세계적으로 지구 온난화 등의 요인으로 태풍, 가뭄, 국지성 호우 등이 빈번해지고, 생활수준의 향상과 경제활동의 증가로 물 수요는 지속적으로 증가하고 있으나 수자원은 한정되어 있어 향후 물 수급의 불균형이 예상되어진다. 하지만 새로운 수원확보는 자연환경 파괴, 주민 반대등으로 새로운 시설을 건설하기가 어려운 현실에서 새로운 용수원으로 이용 가능한 방안으로는 지하수 개발, 해수의 담수화, 중수도를 포함하는 하수처리수의 재이용 방안 등이 해결책이 될 수 있으나, 현 단계에서

채택할 수 있는 방안으로는 기본적인 물 사용량의 절감을 전제로 한 하수처리수의 재이용 방안이 가장 타당성이 있는 것으로 판단된다[1]. 하수처리수는 현재까지 이용이 보편화되지 않은 중요한 잠재수자원으로서 종래에는 직접재이용량이 매우 적었으나, 중수도 원수로서 도시하천의 희석용수 및 위락용수, 공업용수 및 일반 잡용수, 공원 등의 조경용수 등의 용도로 공급하는 방안에 대한 검토 및 시행요구가 예상되어진다.

물 재이용 시스템을 운영하기 위해서는 전력이 확보되어야 하는데, 기존의 전력공급은 기저부하를 최대한 확보하여 전력 수요에 대응해 왔지만, 앞으로는 수요의

본 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Min-Jae Kang(Jeju National Univ.)

Tel: +82-64-754-3666 email: minjk@jejunu.ac.kr

Received December 15, 2014

Revised (1st December 30, 2014, 2nd January 6, 2015)

Accepted January 8, 2015

관리·제어를 고려한 부하관리(Load management) 또는 수요반응(Demand response)을 적극적으로 추진하고 있으며, 또한 에너지원의 효율적 활용을 목표로 하는 폭넓은 정책이 시행되고 있다. 물 재이용을 위한 처리시스템에서 펌프운전의 목적은 수용가의 수요유량을 만족시키면서 물탱크 또는 저장시설의 안정적인 유량을 유지시키는 것이다. 또한 다른 중요한 목적은 전력요금과 연계된 에너지 소비를 효율적이고, 정밀하게 감소시키는 것이라 할 수 있다[2]. 물처리 펌프운전의 피크전력 저감과 효율성을 높이기 위해 공급되는 외부의 풍력, 태양광 등의 신재생에너지와 에너지저장장치를 이용하여 상용전원의 사용을 분산시켜 전체 에너지를 절감시키는 방법이 연구되고 있다[3]. 하지만 신재생에너지를 이용한 방법은 근본적인 전력관리 측면에서는 유리하게 작용하지만 인프라를 구축을 위한 초기 설치비용과 유지보수에 대한 비용적 부담을 가지고 있다.

기존 상용전원을 사용하는 물처리 펌프운전시스템의 사용 에너지비용을 절감하기 위한 방법으로 유전자알고리즘(Genetic algorithm)[4-5], 시뮬레이티드어닐링(Simulated annealing)[6]등을 사용하여 펌프시스템 최적화 모델을 설계하고, 펌프의 동작여부에 대한 스케줄링운전을 통한 비용절감방안을 제시하였다[7]. 이러한 연구에서 제안된 알고리즘의 결과는 좋은 성능을 나타내었으나 최적화된 결과를 계산하는 시간이 길고 다소 복잡한 구조를 가지고 있어 기 구축된 실제 시스템 적용에 있어 한계를 가지고 있다.

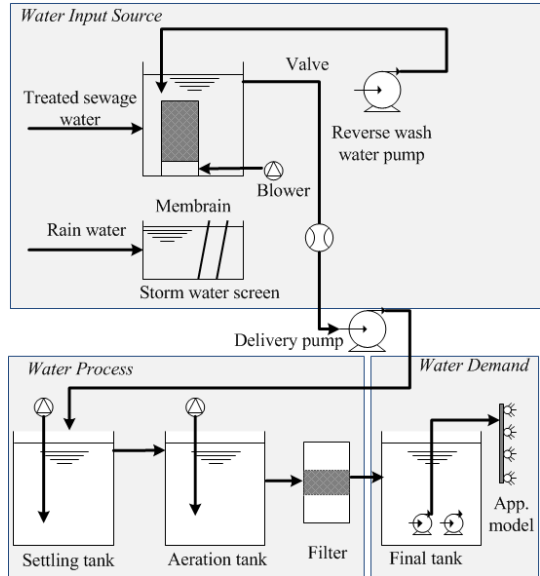
본 논문에서는 국내에 시행되고 있는 시간대별 요금제(Time of Use) 기반에서 중부하 시간대와 최대부하 시간대에 대한 구간을 설정하고, PSO 알고리즘을 이용하여 펌프시스템을 제어하여 시간당 수요유량(Demand)을 처리함에 있어 물탱크 및 저장소의 안정된 범위내에 유량을 조절할 수 있는 안정성과, 입력 전력을 제어함으로써 펌프시스템 운전 시간대를 이동시켜 기존의 수위기반 제어방식과 비교하여 에너지 사용비용을 절감할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 물 재이용 유량 조절 제어모델

물 재이용 처리시스템은 처리수 종류에 따라 우수이

용과 하수처리수로 구분되는 물 공급원 부, 물 재이용을 위한 물 처리부, 처리된 물을 사용하는 물 수요부 크게 3개의 영역으로 구분할 수 있다.



[Fig. 1] Water reuse system configuration

그림 1은 물 재이용 처리시스템을 나타낸 것으로 다수의 펌프와 물탱크 밸브 등으로 구성된다. 물 재이용 처리시스템의 중요한 역할을 하는 물 처리를 위한 펌프운전 제어는 현재의 수위에서 수용가가 요구하는 유량을 안정적으로 전달하기 위한 제어를 할 수 있어야하며, 인입 유량은 밸브 등의 장치를 통해 유입되며, 출력 유량은 펌프의 가동에 따른 출력용량으로 나타낼 수 있다. 그리고 처리된 물을 이송시키기 위한 펌프시스템은 단일펌프와 단일 물탱크 구성 또는 다중펌프와(n) 다중 물탱크(j)로 구성할 수 있기 때문에 물탱크의 수위는 식 (1)과 식 (2)의 형태로 나타낼 수 있다[4].

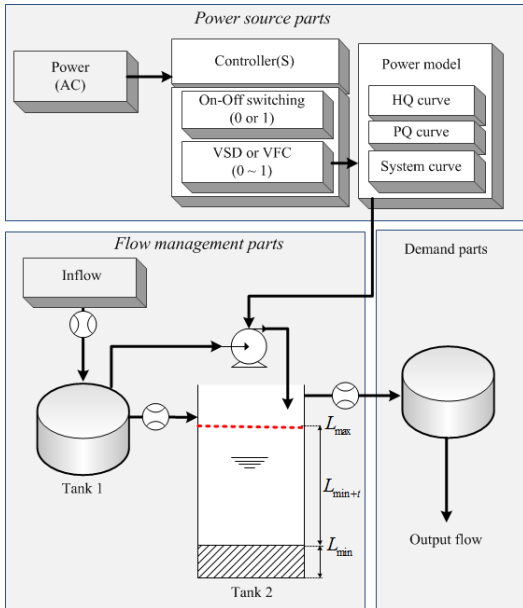
$$L_{(i+1)} = L_i + u_i q_{full} - d_i \quad (1)$$

$$L_{j,(i+1)} = L_{j,i} + \sum_n q_{n,i} u_{n,i} - d_{j,i} \quad (2)$$

단일구성 펌프시스템의 경우 L_i 는 물탱크의 i 차 펌프가 제어시한(Control interval)에서 수위이며, u_i 는 i 차 펌프 제어시한에서 스위칭 상태, q_{full} 은 펌프가동 시 최대 출력 유량, d_i 는 수용가가 요구하는 수요유량이다.

또한 다중으로 구성된 펌프 시스템의 경우 $L_{j,i}$ 는 i 차 펌프제어 시한에서 j 차 물탱크의 수위, $q_{m,i}$ 는 i 차 제어 시한의 j 차 물탱크의 n 차 펌프의 유량, $u_{n,i}$ 는 i 차 제어 시한에서 n 차 펌프의 가동상태, $d_{j,i}$ 는 i 차 제어시한에서 j 차 물탱크의 수요유량을 나타낸다. 단일 펌프시스템 구성에서 펌프의 동작이 정지한 경우 다음단계 수위 ($L_{(t+1)}$)는 현재의 수위(L_t)에서 수요가의 요구유량(d_i)을 출력으로 내보냈을 때의 수위가 된다.

일반적으로 펌프의 동작은 on-off 동작을 수행하는 이진(binary)기반의 동작하는 방식과 펌프의 속도를 조절하여 유량을 제어하는 방식이 사용되고 있다. 그림 2에 본 논문에서 적용한 이진 펌프 제어시스템과 가변 펌프 제어시스템을 나타내었으며, 전원부, 유량 및 수위 관리부, 수요량 제어부로 시스템 구성이 가능하고 제어시한에서 스위칭 시한 결정과 펌프의 종류에 따른 속도 또는 주파수 조절을 통한 유량제어가 가능한 구조로 구성하였다. 또한 펌프의 특성과 전력곡선을 사용하여 펌프 용량에 대한 전력 모델을 적용하였다.



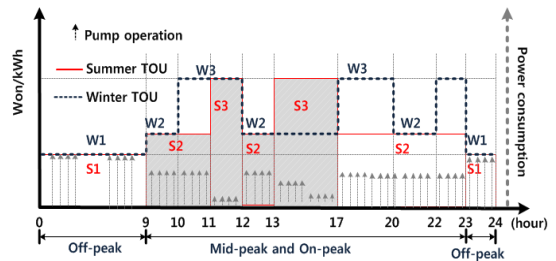
[Fig. 2] Pumping system

2.2 계시별요금제 기반 제어구간 설정

펌프시스템 사용비용을 절감하기 위해서는 계시별요금의 특성상 시간대별 사용 요금이 다르기 때문에 시간에 따른 최적화된 운용을 하여야만 한다. 그림 3은 여름

철과 겨울철에 대한 사용시간대별 펌프제어를 스케줄링하여 사용전력량을 감소시키는 방법으로 펌프운전의 스위칭 시한을 중부하시간대가 시작되는 오전 09시를 기준으로 사용량과 최대부하 사용에 대한 제약조건을 적용시킨다.

계시별요금제에서 여름철의 경우 전력요금이 가장 낮은 경부하 시간대(S1)구간에서는 전력사용을 최대한 사용하여 물탱크에 저장용량을 확보하고 중부하 시간대 S2 구간에서는 가변적으로 유량의 기울기를 조절할 수 있게 펌프를 제어하며 최대부하 시간대 S3 구간에서는 펌프의 동작을 정지하여 최대한 수요량을 만족시킴으로서 전체적으로 전력사용 시간을 낮은 요금대로 가동을 이전함으로써 전력요금 절감 또는 순수 사용량 절감의 효과를 얻을 수 있다.



[Fig. 3] A scheme of the pumping process

시간에 따른 전력사용 요금 $C(t)$ 는 계절별 요금 선택과 시간대별 사용요금으로 결정되는데 여기서 이송 펌프의 시간당 스위칭 시한에 따라 1시간 평균에 대한 계산식을 (3)과 같이 하여야 한다[8].

$$C(t) = B_{cost} \cdot P_{peak} + \left(\sum_t^{LL} P_{tl} + \sum_t^{HL} P_{th} + \sum_t^{ML} P_{pm} \right) \quad (3)$$

여기서 B_{cost} 와 P_{peak} 는 각각 계절별 기본요금과 전력을 사용한 기간의 최소시한 15분에 대한 평균 사용 전력량으로 사용기간 수요시한 중 최대 부하 전력량 값을 나타낸다. LL 은 경부하시간대, HL 은 중부하 시간대, MD 는 최대부하 시간대에 사용한 전력에 각각의 비용을 곱한 값을 나타낸다. 표 1은 본 논문에 사용된 일반용(을) 전기 요금을 나타내었다.

[Table 1] Electric rates table for general service (B)

Classification		Demand charge (won/kW)	Energy charge (won/kWh)		
			Time period	summer	winter
High-Voltage B	option II	7,380	off-peak load	56.2	63.2
			mid-load	108.5	108.5
			peak-load	189.7	164.7

2.3 펌프시스템 에너지 비용 최소화 제어

계시별 요금제에서 펌프운전의 에너지 비용을 절감한다는 것은 기본적으로 24시간동안 각각의 시간대별 펌프의 사용에 따른 에너지 비용을 최소화하는 펌프가 동작하였을 때 최대유량을 기반으로 한 스위칭을 고려한 최적화 목적함수는 사용전력에서 펌프의 사용여부에 대한 값을 최소화 하는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min J = \sum_{t=1}^T \{u(t) \cdot p(t) \cdot c(t)\} \quad (4)$$

여기서 T 는 하루 스위칭 시한의 총합으로 15분 기준인 경우 96이며, $u(t)$ 는 펌프의 동작상태를 나타내고, $p(t)$ 는 사용전력, $c(t)$ 는 24시간을 기준으로 수용가에 부과 되는 계시별 전력요금이다.

펌프의 사용전력 모델을 적용한 시스템의 경우 속도를 조정하여 유량을 조절할 수 있으며, 목적함수의 경우는 유량과 펌프 스위칭 두가지에 대한 최적화를 의미하며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\min J = \sum_{t=1}^T \{f_q(t) \cdot u(t) \cdot c(t)\} \quad (5)$$

여기서 $f_q(t)$ 는 펌프의 입력 전력과 유량에 대한 연관성을 통해 구한 펌프용량함수이다.

펌프의 속도가 고정된 경우 입력전력은 식 (6) 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \frac{9.81hq_c}{3.6\eta} \quad (6)$$

여기서 p 는 펌프의 입력 전력[kW], q_c 는 펌프의 용량, h 는 펌프의 양정, η 는 펌프의 효율을 나타낸다.

펌프의 속도를 제어할 수 있는 경우 입력전력은 펌프 제조사에서 제공하는 펌프의 성능곡선과 펌프의 상사법칙을 이용하여 식 (7)의 양정과 식 (8)의 모터rpm에 대한

전력소비를 구할 수 있다[9].

$$h = Aq^2 + Bsq + Cs^2 \quad (7)$$

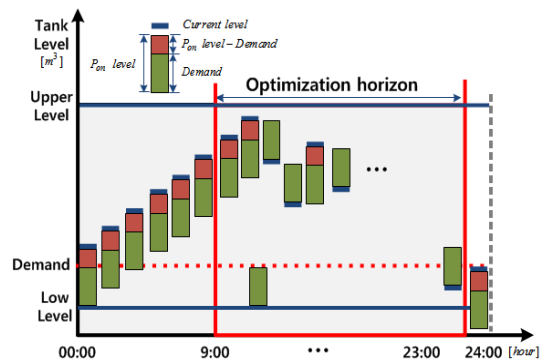
$$p = Gq^3 + Hq^2s + Iqs^2 + js^2 \quad (8)$$

펌프를 동작하기 위해서는 물탱크에 유입과 유출의 경계를 결정해야하며 상한치와 하한치에 대한 제약조건을 설정하여야 한다. 물 재이용 처리 시스템이 동작하는 시간에 물탱크의 유입과 유출되는 유량에 의한 수위변화는 상한치와 하한치를 초과하지 않아야 하며, 이 경계조건은 식 (9)와 같이 설정한다.

$$L_{low} \leq L_{cur} \leq L_{high} \quad (9)$$

여기서 L_{low} 과 L_{high} 는 시간에 따른 수위에 대한 상한치와 하한치이며 현재의 수위 L_{cur} 는 식 (1)의 수용가의 수요유량을 처리할 수 있는 범위내에서 상한과 하한의 수위를 유지하여야 한다.

수용가의 수요유량에 대해 전력사용이 경부하 시간대 펌프사용 전력 입력을 기반으로 중부하와 최대부하 시간대의 출력을 계산하기 위해 최적화 구간을 설정하여 펌프 스위칭을 조절할 수 있는 제어를 위해 그림 4와 같이 시간에 따른 유량과 펌프동작을 설계한다. 현재의 수위는 펌프동작 시 유량에서 수요유량의 차이만큼 상승하게 되고, 펌프가 정지상태의 경우 수용가 수요유량만큼 수위가 내려가게 된다. 최적화 구간은 중부하 시간대와 최대부하 시간대가 존재하는 구간을 설정하며, 1일의 최종 수위는 다음날의 기준 수위로 수용가 수요유량 변경 등을 고려하여 새롭게 펌프를 동작시킬 수 있도록 하였다.



[Fig. 4] Optimization horizon switching strategy

2.5 PSO 제어알고리즘

PSO(Particle Swarm Optimization)은 1995년 Kennedy와 Eberhart에 의해 처음 소개되었다 [10]. PSO 알고리즘은 국부최소값(Local minimum)에 빠지기 쉽다는 단점을 가지고 있으나, 다른 탐색 알고리즘과는 달리, 진화 연산처럼 방대하고 복잡한 함수에 대하여 전역적인 최적화(global optimization)를 할 수 있고, 진화 연산보다 수행 속도가 빠르기 때문에 최근 크게 주목 받고 있으며 기존의 알고리즘으로는 해결하기 어려운 여러 분야에 적용되고 있다. PSO 알고리즘은 개별 잠재해를 입자(Particle)로 나타내며, 초기에 차원 설정에 의해 개수가 결정되며, 개별입자들은 식 (10)과 같이 위치(Position)와 속도(Velocity)라는 속성을 갖는다.

$$P_{a,b}(k+1) = P_{a,b}(k) + V_{a,b}(k+1) \quad (10)$$

여기서 $P_{a,b}(k)$ 는 k 차 반복에서 a 차 입자의 b 차 차원의 위치값이고, $V_{a,b}(k)$ 는 k 차 반복에서 a 차 입자의 b 차 차원의 속도값을 나타낸다. 반복과정에서 입자들은 다차원 탐색공간을 이동하며 적합도 함수에 의해 평가된 적합도 함수값을 사용하여 적합도 함수값이 높은 위치로 이동하게 된다. 각 입자가 반복을 통해 찾아낸 최적해(pbest)와 모든 입자의 반복을 통해 전체 최적해(gbest)를 통해 결과값을 얻을 수 있고, 업데이트된 속도벡터는 식 (11)과 같다.

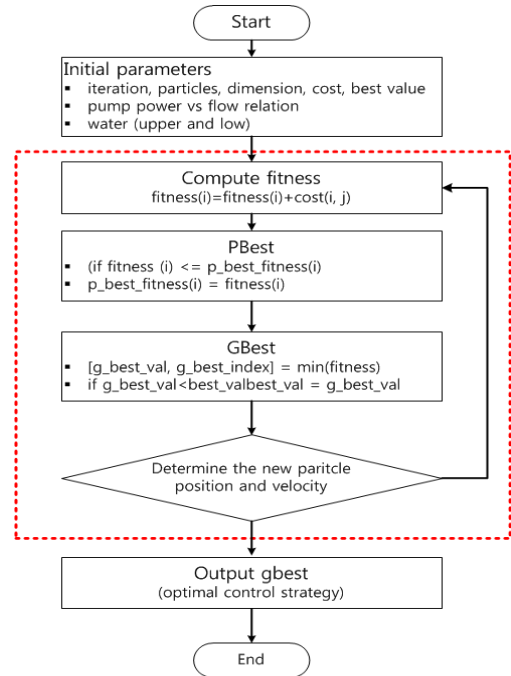
$$V_{a,b}(k+1) = \omega_c \cdot V_{a,b}(k) + C_1 \cdot R \cdot (pbest_{a,b} - P_{a,b}(k)) + C_2 \cdot R \cdot (gbest_b - P_{a,b}(k)) \quad (11)$$

여기서 ω_c 는 관성계수(Inertia coefficient), C_1 과 C_2 가중치계수, R 은 난수, $pbest_{a,b}$ 는 a 차 입자에 대한 현재 최적해, $gbest_b$ 는 현재의 전체 최적해이다.

업데이트된 k 의 위치벡터는 식 (12)와 같다.

$$P_{a,b}(k+1) = P_{a,b}(k) + \omega_c \cdot V_{a,b}(k) + C_1 \cdot R \cdot (pbest_{a,b} - P_{a,b}(k)) + C_2 \cdot R \cdot (gbest_b - P_{a,b}(k)) \quad (12)$$

PSO 알고리즘 수행 절차는 기본적인 수위의 상한과 하한 등의 파라미터 초기치를 설정하고 펌프의 출력 전력을 계산하고 적합도 계산, pbest, gbest를 계산하게 되며 그 수행 절차를 그림 5에 나타내었다.



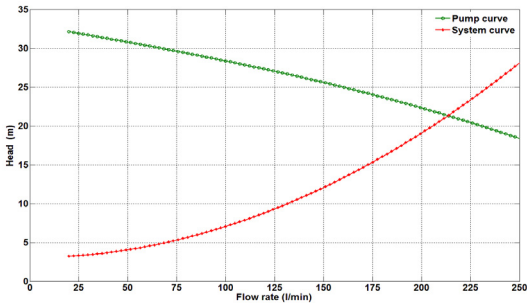
[Fig. 5] PSO algorithm procedure.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

물 처리 펌프시스템에서 전력 사용요금과 사용량 절감 위한 방법을 검증하기 위해 물 재이용 처리시설의 이송펌프의 출력 유량과 수용가의 수요 유량에 대한 수위를 조절하였다. 또한 사용전력에 대한 계절적인 요인으로 여름철을 선택하고, 시간대별 부하사용 요금을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 본 논문에서는 가변주파수 제어(variable frequency control)와 가변속 드라이브(variable speed drive) 동작이 가능한 펌프를 고려하였으며 계시별요금제는 일반용(을)을 사용하였다. 또한 파이프 길이는 4[m], 효율은 80[%]를 고려하였다. 수요유량(d)이 $75(m^3/h)$ 이고 입력전력을 가변하지 않은 경우 펌프가 동작하면 고정된 유량 $101(m^3/h)$ 을 전달하는 시스템에 대해 시뮬레이션을 하였다. 또한 고정된 수요유량에서 좋은 성능을 보인 LP(Linear programming) 방식[8]의 경우 적용시스템에 대한 정확한 입력 유량과 수요유량 정해져야 하며 사용중에 외부의 영향으로 이 값들이 변경될 경우 시스템의 오류가 발생되어 LP를 초기화 하여 다시 설정하여야 하는 문제를

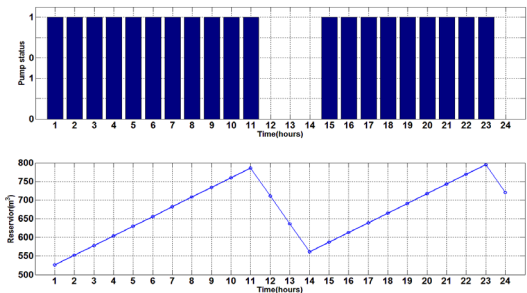
가지고 있다. 본 논문에서는 수요유량이 시간대별로 변화하는 경우 물 재이용처리시스템을 안정적으로 동작할 수 있는 유량과 전력량을 제어할 수 있는 PSO를 적용할 경우 시스템의 오류없이 동작할 수 있음을 확인하기 위해 경부하시간대, 최대부하시간대의 일부 구간에서 85 (m^3/h)로 수요유량이 변경되었을 때를 시뮬레이션을 수행하였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 위해 제조사에서 제공되는 펌프 용량(Q), 양정(H), 전력(P)을 2차 방정식으로 피팅하여 그림 6과 같이 시스템 곡선을 선정한다.



[Fig. 6] System and pump operating curves

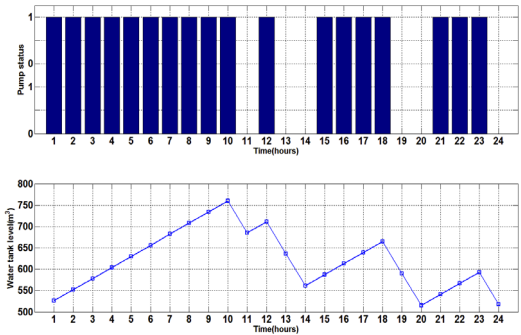
그림 7은 일반적인 수위 기반의 펌프 스위칭 동작과 수위변화를 나타내었는데, 계시별 요금제의 시간대별 요금을 고려하지 않고 경부하 시간대 운전과 중부하와 최대부하 시간대에도 수위의 상한(L_{high})과 하한(L_{low}) 사이에서 연속적으로 동작하는 특성이 있다. 사용전력은 최대전력이고 이때 출력유량은 $101[m^3/hour]$ 이다. 제약조건이 물탱크 수위의 상한과 하한이 전부이기 때문에, 전력피크나 에너지 사용요금 측면을 고려하기가 어렵다.



[Fig. 7] On-off switching control

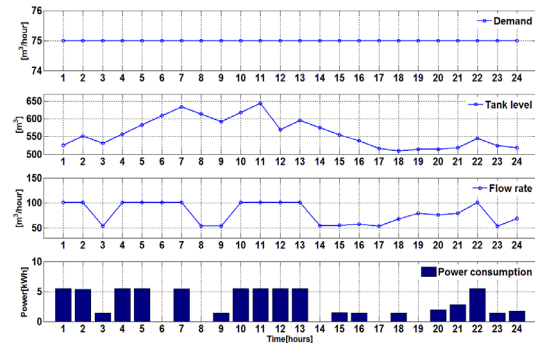
그림 8은 PSO 알고리즘을 이용한 펌프 동작상태와 수위를 나타낸 것이다. 기존의 수위 기반의 펌프 스위칭과

동일하게 식 (1)을 사용하여 펌프가 가동되면 최대전력을 사용하여 수요유량을 처리한다. 기존 방식과의 차이 점은 수위레벨이 상한이 아닌 상태에서 펌프를 가동시킬 수 있어 에너지 사용비용이 높은 시간대에서 펌프가동을 정지할 수 있다. 시뮬레이션 결과 최대부하시간대 11시, 13시, 14시에 펌프의 동작을 정지하였고, 중부하시간대 19시와 20시에 펌프를 정지함으로써 에너지 비용을 절감할 수 있다



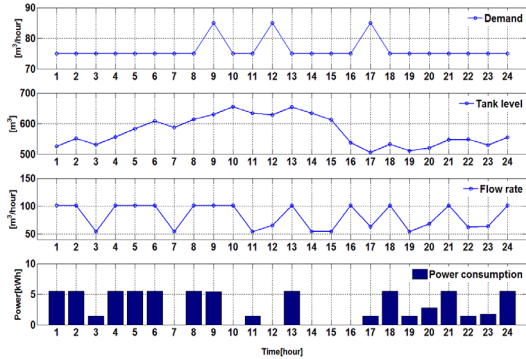
[Fig. 8] PSO switching control

그림 9는 고정된 수요유량 $75(m^3/h)$ 에서 식 (5)의 유량과 입력전원의 제어를 동시에 PSO 알고리즘을 이용한 펌프의 동작상태와 수위를 나타낸 것이며, 수위는 식 (2)를 사용하게 된다. 여기서 계산된 전력에 대한 유량모델을 사용하여 최소 모터의 rpm 최소 출력 $54[m^3/hour]$, 최대 모터의 rpm 최대 출력에서 $101[m^3/hour]$ 사이의 값으로 유량을 제어하게 된다. 시뮬레이션 결과 중부하시간대와 최대부하시간대가 집중된 13시 이후의 물탱크 수위가 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 전력사용 또한 조절이 가능하여 에너지 사용비용을 절감할 수 있음을 확인할 수 있다.



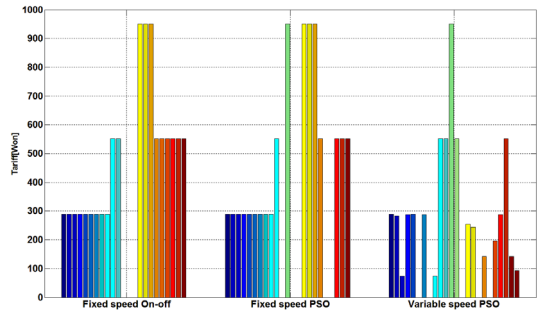
[Fig. 9] PSO control with variable power (fix demand)

그림 10은 9시, 12시, 17시에 수요유량 $75(m^3/h)$ 에서 수요유량 $85(m^3/h)$ 이 변경되었을 때 본 논문의 PSO의 성능을 나타낸 것이다. 수요유량이 변경되더라도 출력유량과 사용전력을 동시에 제어함으로써 안정적으로 물 탱크의 수위를 조절함을 확인할 수 있다. 수요유량의 증가로 수위의 조절범위는 축소되었으나, 최대부하시간대가 집중된 13시 이후 수위를 낮게 나타낸 것을 통해 에너지 절감을 확인할 수 있다.



[Fig. 10] PSO control with variable power(variable demand)

그림 11은 수요유량이 고정된 상태에서 각각의 펌프 제어 방식에 따른 시간별 에너지 비용에 대한 결과를 나타낸다. 시간대별 에너지 사용비용의 경우 최대전력을 사용하는 수위기반 제어와 PSO방식의 경우 유사한 패턴을 나타내고 있으나, 유량과 전력을 제어하는 PSO 방식의 경우 13시의 경우 최대부하시간대 비용이 적용되어 가장 높은 요금을 나타낸 것을 제외하고 에너지사용 비용이 분산된 형태의 패턴을 나타내었다. 기존의 펌프운전 방식은 시간대별 사용요금에 고려되지 않아 중부하시간대 또는 최대부하 시간대의 펌프 운전됨으로써 순수 사용한 전력량에 비해 상대적으로 에너지 비용이 높음을 알 수 있다. 각각의 펌프운전방식에 따른 1일 전력사용요금합계는 각각 9,869원, 9,164원, 6,102[원]으로 입력전력과 유량제어가 가능한 PSO를 이용한 펌프운전의 경우 에너지 비용이 30%이상 저감할 수 있음을 알 수 있다. 수요유량과 초기 수위에 따라 에너지 비용은 다르게 나타나지만 1개월을 동일 패턴으로 펌프를 운전하였을 경우 기본요금을 포함한 에너지 사용비용은 303,450원, 282,300원, 190,440원으로 최대 37%정도 절감할 수 있다.



[Fig. 11] Energy cost for control method.

4. 결론

본 논문에서는 계시별 요금제 기반에서 물재이용펌프 시스템 운용을 위해 중부하시간대와 최대부하시간대에 대한 제어구간을 설정하고 펌프의 입력전력의 스위칭 제어와 출력유량을 제어하여 수요유량의 안정적 공급과 에너지 비용절감을 할 수 있는 PSO를 사용한 제어방법을 제안하였다. 기존의 상한치와 하한치 기반의 수위에 따라 on-off 펌프제어방식에 비해 사용전력 대비 전력요금 절감할 수 있음을 확인하였다. 특히 입력전력과 유량 조절이 가능한 펌프의 경우 기존 on-off 펌프제어 방식에 비해 30%이상의 에너지 비용을 저감할 수 있음을 확인하였다. 또한 수요유량 변화에도 유량과 전력량을 조절할 수 있는 PSO 방법의 경우 안정적으로 수위유량을 처리 할 수 있음을 확인하였다. 향후 물 재사용에 대한 수요유량의 시간대별 변화에 대한 영향분석과 펌프장치의 효율과 이송거리에 따른 영향 등을 고려하여 실제 시스템에 적용하여 에너지 비용을 최소화할 수 있는 시스템 운용에 관한 연구를 진행 할 예정이다.

References

- [1] Yong Tae Kang, Jeong Hyun Kim, "Configuration of the Optimum System for the Reuse of Wastewater", Korean Society of Water Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 3-14, 1995.
- [2] K. W. Little and B. J. McCrodden. "Minimization of raw water pumping costs using milp", Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 115, No. 4, pp. 511 - 522, 1989.

DOI:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1989\)115:4\(511\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1989)115:4(511))

- [3] C. Gopal, M. Mohanraj, P. Chandramohan, P. Chandrasekar, "Renewable energy source water pumping systems- A literature review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 25, pp. 351-370, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.04.012>
- [4] Mahdi Moradi-Jalal and Bryan W. Karney., "Optimal design and operation of irrigation pumping stations using mathematical programming and genetic algorithm (GA)", Journal of Hydraulic Research, Vol. 46, No. 2, pp. 237 - 246, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2008.9521858>
- [5] Van Zyl, J.E., Savic, D.A., Walters, G.A., "Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm", Journal of Water Resources Planning and Management, pp. 160-170, 2004.
DOI:[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:2\(160\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(160))
- [6] G. McCormick and R.S. Powell, "Derivation of near-optimal pump schedules for water distribution by simulated annealing", Journal of the Operational Research Society, Vol. 55, No. 7, pp. 728 - 736, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601718>
- [7] M.H. Afshar, R. Rajabpour. "Optimal design and operation of irrigation pumping systems using particle swarm optimization algorithm", International Journal of Civil Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 302-311, 2007.
- [8] Chang Jin Boo and Ho Chan Kim, "Optimal Operation Control for Energy Saving in Water Reuse Pumping System", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 5 pp. 2414-2419, 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.5.2414>
- [9] Eberhart R and Kennedy J., "A New Optimizer Using Particles Swarm Theory", Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science (Nagoya, Japan) IEEE Service Center, Piscataway, pp. 39-43, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MHS.1995.494215>
- [10] X. Meng, H. Wang, "Application of hybrid genetic algorithm in frequency speed control pumping station", in 4th international Conference on Natural computation, Shan Dong, China, pp. 337-341, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICNC.2008.195>

부 창 진(Chang-Jin Boo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 제주대학교 전기공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 전기공학과(공학박사)
- 2014년 4월 ~ 현재 : 제주국제대학교 전기에너지공학과 조교수

<관심분야>

에너지 효율, 접지시스템, 신재생에너지, 스마트그리드

김 호 찬(Ho-Chan Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과(공학박사)
- 2008년 2월 ~ 2009년 2월 : 미국 펜스테이트 방문교수
- 1995년 9월 ~ 현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

신재생에너지, 풍력발전, 에너지효율

강 민 제(Min-Jae Kang)

[정회원]



- 1982년 2월 : 서울대학교 전기공학과(공학사)
- 1991년 2월 : 미국 루이빌대 전기공학과(공학박사)
- 2003년 2월 ~ 2004년 2월 : 미국 일리노이주립대학 방문교수
- 1992년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

신경회로망, 접지시스템 설계, 풍력 발전 제어