

에너지절감을 위한 물 재이용 펌프시스템의 최적운전 제어

부창진¹, 김호찬^{1*}
¹제주대학교 전기공학과

Optimal Operation Control for Energy Saving in Water Reuse Pumping System

Chang-Jin Boo¹ and Ho-Chan Kim^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Jeju National University

요 약 본 논문에서는 물 재이용 펌프 시스템의 에너지 효율적 운전 방법을 제안한다. 1시간 단위의 시간대에서 최적운전제어를 위해 예측구간 스위칭방법과 선형계획법을 적용하고 에너지 비용은 경부하, 중부하, 그리고 최대부하를 포함한 TOU 요금과 피크요금을 통해 산정하도록 한다. 물 재이용 펌프시스템에서의 최적운전은 TOU 요금과 피크요금을 포함한 에너지 비용을 최대로 줄일 수 있도록 수행한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 최적운전방법을 적용하면 많은 전력 에너지 비용의 절감과 전력계통의 안정성 향상을 확인할 수 있다.

Abstract This paper presents an optimal operation control method for energy saving in the water reuse pumping system. A predictive horizon switching strategy is proposed to implement an optimal operation control and a linear programming (LP) 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 optimal operation in water reuse pumping systems is determined to reduce the TOU and peak costs. The simulation results show a power energy saving for water reuse pumping systems and power stability improvement.

Key Words : Pump switching, energy saving, optimal control, linear programming, demand side management

1. 서론

최근의 도시화와 경제성장에 따라 물 수요가 증가되고 있는 반면 수질환경 오염 및 수자원의 고갈로 인하여 물 이용률을 높일 수 있는 용수원의 추가확보는 중요한 문제로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 지하수 개발, 해수의 담수화, 중수도를 포함하는 하수처리수의 재이용 방안 등에 대한 방안을 고려하고 있으나 현 단계에서 채택할 수 있는 방안으로는 기본적인 물 사용량의 절감을 전제로 한 하수처리수의 재이용 방안이 가장 타당성이 있다고 할 수 있다[1]. 하수처리수는 현재 까지 이용이 보편화되지 않은 중요한 잠재수자원으로서 종래에는 처리수를 직접적으로 이용하는 양이 적었으나,

중수도 원수로서 도시하천의 희석용수 및 위락용수, 공업용수 및 일반 잡용수, 공원 등의 조경용수 등의 용도로 공급하는 방안에 대한 검토 및 시행요구가 고조되고 있는 실정이다.

이러한 물 재이용 처리시설을 운영하기 위해서는 전기 에너지를 사용하는 막처리용 펌프, 유량이송 펌프, 블로워 등의 펌프관련 설비가 필수적이라 할 수 있다. 펌프의 사용 용도는 탱크 또는 저장소가 요구하는 안정적인 처리량을 유지하는 것과 압력에너지를 이용하는 역삼투법(reverse osmosis) 등의 수처리 방법 적용에 사용된다. 펌프 운전에서 사용되는 많은 양의 전기에너지는 에너지 생산을 위한 발전소 건설의 한계와 지구환경 제약에 대한 에너지상황 등을 고려해야 한다는 점에서 전세계적으로

*Corresponding Author : Ho-Chan Kim

Tel: +82-10-9753-1595 email: hckim@jejunu.ac.kr

접수일 12년 04월 09일

수정일 (1차 12년 05월 04일, 2차 12년 05월 07일)

게재확정일 12년 05월 10일

주된 관심 사항이 되고 있다. 이러한 점들을 해결하기 위해 사용자 측면을 고려한 부하관리와 수요관리를 통해 적극적으로 에너지 절감 방안을 추진하고 있으며, 에너지원의 효율적 활용을 목표로 하는 폭넓은 정책이 마련되어 시행되고 있다. 물 재이용 기술의 활용을 위한 설비의 경제적인 운영과 관련된 전기에너지 사용 측면의 다른 중요한 목적은 사용 전력에 대한 요금체제와 관련된 에너지 소비 요금을 감소시키는 것이라 할 수 있다[2]. 일반적으로 비교적 사용량이 적은 시간대 전력사용은 계통 전체로 볼 때 시간대별 요금제(time of use, TOU) 체계에서 경부하(light load) 시간대 사용을 의미하고, 사용량이 많은 중부하(heavy load)와 최대부하(maximum load) 시간대의 요금은 익일 중 최대전력 사용이 나타날 수 있는 가능성이 높다. 그러므로 사용된 전기 요금의 감소는 총 부하 사용의 절감과 부하 사용 시간대의 이동 방법을 통한 전기요금의 절약을 의미하는 사용자의 효율적인 전력 사용을 통한 수요 측면의 관리라고 할 수 있다.

이러한 수요관리(demand side management) 측면에서 펌프 부하에 대한 효율적인 사용을 위한 관련 연구방법으로는, 다양한 펌프운전 스케줄링기법과 알고리즘을 사용하여 부하를 이동시켜 전력시스템 운영의 안정성을 확보하는 방법[3]과 기존의 발전소에서 생산된 전력을 사용하는 방식이 아닌 외부의 풍력, 태양광 등의 신재생에너지를 이용하여 계통의 에너지를 분산 시켜 전체 에너지를 절감시키는 방법[4] 등이 있다. 신재생에너지를 이용한 방법은 기저부하의 안정적인 활용이 가능하여 전력관리 측면에서는 유리하게 작용하지만 인프라를 구성하기 위한 초기의 설치비용과 유지보수 비용에 대한 비용적 부담을 가지고 있다.

물 재이용 처리에 사용되는 펌프의 운전을 최적화하여 전기에너지 효율 개선 및 절감 목적을 달성하기 위해서는 펌프의 운전 시한을 위한 알고리즘이 필수적으로 필요하다. 알고리즘 개발과 관련된 연구 방법으로는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)[5], 시뮬레이티드어닐링(simulated annealing)[6]등의 진화알고리즘을 이용한 펌프 스위칭 시한의 최적화 방법들과 개체군집최적화(particle swarm optimization)를 사용한 2단계 펌프시스템 최적화 모델을 설계하고 모델기반의 펌프운전을 통한 에너지 사용 비용 절감 방법[7] 등이 있다. 제시된 방법의 결과들은 우수하게 나타났으나, 계산 시간이 길고 복잡한 구조들을 가지고 있어 실제 시스템에 적용하기에는 많은 한계를 가지고 있다.

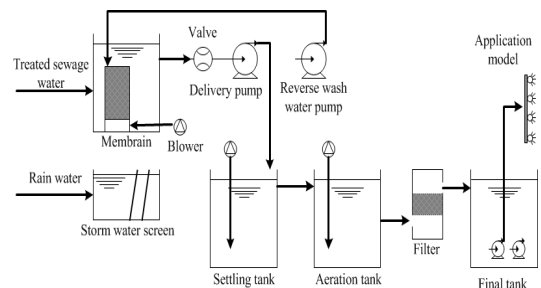
본 논문에서는 현재 시행되고 있는 시간대별 요금제에서 제어구간을 설정하고 펌프의 스위칭 시한 최적화를 통한 전력사용에 대한 비용을 최소화하는 방법을 제안하

고자 한다. 이를 위해 물재이용 처리 시스템의 인가되는 유량과 출력되는 유량에 대한 빠른 계산을 수행하고, 전력요금이가장 낮은 경부하 시간대에서의 펌프운전 결과를 활용하여 중부하와 최대부하 시간대에서 인가되는 유량과 출력되는 유량을 조절하고 전력사용 요금을 최소화하고자 한다. 또한 본 논문에서는 기존의 총 사용 에너지 양에는 변화가 없고, 에너지 사용비용과 전력피크를 감소시키는 부하이동(load shifting) 방법 뿐만 아니라 설정된 제어구간내에서 사용전력을 조절하는 방법을 추가적으로 사용함으로써 피크부하 억제함과 동시에 전체 전력사용량을 절감할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 물 재이용 처리 시스템

본 논문에서 고려할 물 재이용 처리시스템은 처리수 종류에 따라 우수이용과 하수처리수로 구분할 수 있다. 우수 이용의 경우 빗물 스크린을 통해 우수를 확보하고, 하수처리수의 경우 처리된 하수를 2차로 재처리 하는 과정을 통해 처리수를 확보한다. 처리를 위한 시설은 물막을 사용한 하수처리수 재이용시설, 물 저장 처리장치 등으로 구성할 수 있다. 하수처리수가 유입되면 생물막처리조를 통과하여 여과된 물을 이송 펌프로 물재이용 침전조로 보낼 수 있는 구조로 설계 된다. 이러한 설비의 전기설비로 중요한 역할을 하는 장치가 펌프이며 처리된 재이용 물에 대한 응용을 위해서도 추가적인 전기설비가 필요하다. 그림 1은 물 재이용 처리시스템 구성을 나타낸다.



[그림 1] 물 재이용 처리시스템 구성
[Fig. 1] Water reuse system configuration

2.2 전력사용량 요금제도

전력요금정책은 전력수요가 높을 때 전기요금의 단가를 높게 책정하여 소비자의 전기소비 절약을 유도하고

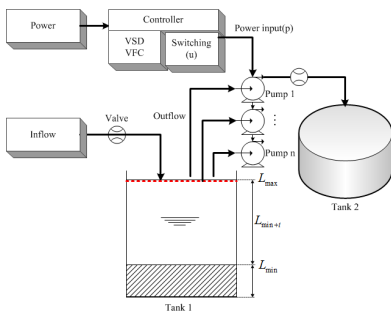
전력공급자의 신규발전설비 투자수요를 줄일 수 있도록 수립한다. 전기요금제도는 전력 사용량이나 사용 시기에 관계없이 동일한 금액을 적용함으로써 연중 정해진 가격으로 부과하는 고정요금제와 변동되는 상황에 부합하여 금액을 적용하는 시간대별요금제, 피크요금제, 실시간 요금제가 있다. 시간대별 요금제의 경우 전력소비가 계절이나 사용시간대에 따라 차이가 클 경우 이를 반영하는 요금제로서 대부분의 국가에서 시행중이며, 국내의 경우 대용량 수용가에 적용하고 있으며 봄가을, 여름, 겨울철에 대한 계절요금과 전력수요에 따라 1일을 3구간 시간대로 구분하여 요금을 차등 부과하고 있다[8].

2.3 제어모델 설계 및 운전알고리즘

물 처리를 위한 펌프운전 제어는 인입되는 유량과 수요자 측에 전달하기 위한 출력되는 양을 조절할 수 있으며, 인입되는 유량은 밸브 등의 장치를 통해 유입되며, 출력되는 유량은 펌프의 가동에 따른 출력용량으로 나타낼 수 있다. 그리고 처리된 물을 이송시키기 위한 펌프는 단일구성에서 다중구성(n)이 존재할 수 있다. 식(1)에 다음 상태의 유량레벨을 나타내었다[4].

$$L_{(t+1)} = L_{tr} + \sum_n A_{rn} \cdot u_{tn} \quad (1)$$

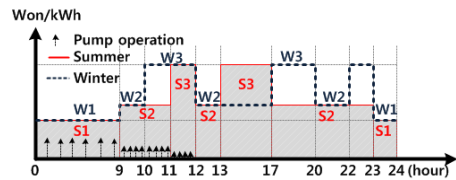
여기서 t 는 펌프 스위칭 동작 시한, L_{tr} 은 저장탱크의 현재 펌프 스위칭 동작 시한에서 저장된 유량레벨, A_{rn} 은 펌프의 다중구조 n 에서 펌프 가동에 따른 유량레벨, 그리고 u_{tn} 은 다중구조 n 에서 펌프 스위칭 시한에 따른 펌프의 가동상태를 나타내며, 펌프의 동작이 정지한 경우 입력되는 유량이 현재의 유량이 된다. 일반적으로 펌프의 동작은 이진(binary) 기반의 동작을 수행하게 된다. 그림 2는 물 재이용 펌프 처리 제어시스템을 나타내며 제어기에서는 스위칭 시한 결정과 펌프의 종류에 따른 속도 또는 주파수 조절을 통한 유량제어가 가능하다.



[그림 2] 물 재이용 처리 펌프 제어시스템
[Fig. 2] Pumping system for water reuse

그림 3은 여름철과 겨울철에 대한 사용시간대별 펌프 스위칭 시한 조절을 통한 사용전력량을 감소시키는 방법으로 펌프운전의 스위칭 시한을 09시를 기준으로 사용량과 최대부하 사용에 대한 제약조건을 적용시킨다.

여름철의 경우 전력요금이 가장 낮은 경부하 시간대 S1에 전력사용을 최우선 순위로 선정하며 중부하 시간대 S2구간 이전에 최소레벨이 되게 펌프를 운전하여 레벨유량을 하한치와 최대한 근사하게 설정한다. 중부하 시간대 S2 구간에서는 가변적으로 유량의 기울기를 조절할 수 있게 펌프를 제어하며 최대부하 시간대 S3 구간에서는 펌프의 동작을 최대한 억제시킴으로서 전체적으로 전력 사용 시간의 이전을 통한 전력요금 절감 또는 순수 사용량 절감의 효과를 얻을 수 있다.



[그림 3] 사용시간대별 펌프 동작처리
[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 계산을 하여야 한다.

$$C(t) = B_{cost} \cdot P_{peak} + \left(\sum_t^{LL} P_{tt} + \sum_t^{HL} P_{th} + \sum_t^{ML} P_{pm} \right) \quad (2)$$

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.

본 논문에서 펌프의 동작은 단일구조의 펌프로 구성되고 현재 유량의 레벨을 기반으로 동작하기 때문에 식(1)을 확장시키면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{t+1} = L_0 + \sum_{t=1}^T I(t) - O(t) \cdot u(t) \quad (3)$$

여기서 L_0 는 현재 유량레벨, T 는 펌프 스위칭 시한의 총합, I 는 일일 저장탱크로 유입되는 유량, 그리고 O 는 펌프의 스위칭을 통해 외부로 유출되는 양을 나타낸다.

또한 저장 탱크에 유입과 유출의 경계를 결정하기 위해 상한치와 하한치에 대한 제약조건을 설정하여야 하는데, 물 재이용 처리 시스템이 운전하는 시간에 저장탱크의 유량은 상한치와 하한치를 초과하지 않게 하기위한 유량 레벨의 경계조건은 다음과 같다.

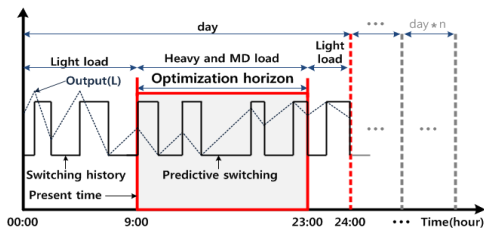
$$L_{low} \leq L_{cur} \leq L_{high} \quad (4)$$

여기서 L_{low} 와 L_{high} 는 시간에 따른 유량에 대한 상한치와 하한치 각각의 조건에 도달했을 때 펌프 동작의 정지와 동작의 최우선권을 가지게 되고, L_{cur} 은 현재유량을 나타낸다. 시간대별 요금제에서 펌프운전의 에너지 비용을 절감한다는 것은 전체적으로 부하 사용을 이동 또는 감소시키는 방법으로 주어진 요금시간에 따른 최적화된 운전 시기를 결정하여 전력요금을 최소화 하는 것을 목적으로 한다. 기본적으로 24시간동안 각각의 시간대별 펌프의 사용에 따른 에너지 비용을 최소화하는 목적함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

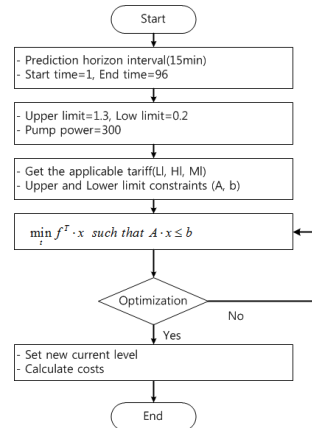
여기서 T 는 하루 스위칭 시한의 총합으로 15분 기준인 경우 96이며, $u(t)$ 는 펌프의 동작상태를 나타내고, $p(t)$ 는 사용전력, $c(t)$ 는 24시간을 기준으로 수용가에 부과되는 전력요금 $C(t)$ 에서 기본요금과 최대사용 전력의 곱을 제외한 순수 사용시간에 따른 스위칭 시한 t 에 대한 전력사용 요금을 나타낸다.

수용가 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. 최적화 구간은 1일 기준으로 설계되며, 다음날의 경부하 시간대의 입력변화가 발생하게 되면 새롭게 구간설정을 할 수 있는 구조로 설계되어 진다.



[그림 4] 예측구간 스위칭 방법
[Fig. 4] Predictive horizon switching strategy

제안한 펌프시스템에서 최적화를 위해 그림 5와 같이 LP 알고리즘을 사용하는데, 첫 번째로 시간에 따른 구간에 대해 펌프 스위칭 동작의 상한과 하한에 대한 경계값을 설정, 구간에 따른 에너지 비용 계산, 그리고 최대부하 사용에 대한 제약조건을 설정하게 된다. 두 번째로 설정된 제약조건들을 통해 유량의 상한과 하한에 대한 출력 유량 제한조건 A , 입력유량 제한조건 b 를 계산한다. 마지막으로 $A \cdot x \leq b$ 에서 사용전력과 에너지비용의 곱으로 나타내는 최소화 목적함수 f 를 통해 시간에 대한 최소화 스위칭 동작 u 를 결정하게 되는데, 여기서 스위칭 동작 u 는 온-오프 동작인 경우 이진값인 0과 1, 전력조절이 가능한 경우는 0~1 사이의 값이 나타날 수 있다.

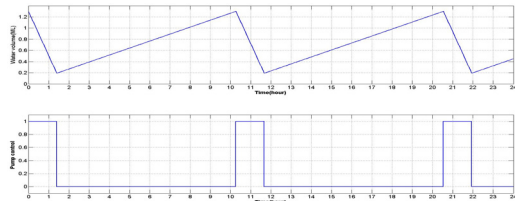


[그림 5] 펌프시스템에서 최적화를 위한 플로차트
[Fig. 5] Flowchart of an algorithm for the optimization in pumping systems

3. 컴퓨터 시뮬레이션

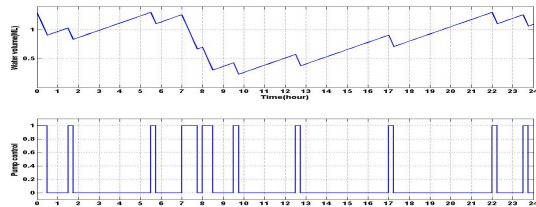
물 처리 펌프시스템에서 전력 사용요금과 사용량 절감 위한 방법을 검증하기 위한 물 재이용 처리시설의 이송 펌프의 입력과 출력 유량과 사용전력에 대한 계절적인 요인으로 여름철을 선택하고, 시간대별 부하사용 요금을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 본 논문에서는 가변주파수 제어(variable frequency control)와 가변속 드라이브(variable speed drive) 동작이 가능한 펌프를 고려하였으며 사용전력은 일반용(을) 계약용량 300[kW]에 대한 특성을 살펴보기 위해 펌프운전 전력량을 300[kW]로 설정하였다. 관련된 저장탱크의 인가되는 유량은 일일 기준으로 3[ML], 펌프를 통해 이송되는 유량은 22[ML], 15분 수요시한에 대한 입력 유량은 0.0313[ML], 그리고 출력 유량은 0.2292[ML]이다.

그림 6은 일반적인 수위레벨 기반의 펌프 스위칭 동작과 유량변화를 나타내었는데, 경부하 시간대 운전과 중부하와 최대부하 시간대에도 동작하는 특성이 있다. 유량이 상한치와 하한치가 펌프 스위칭 동작의 입력이 되므로, 부하관리나 사용요금 측면에서 부하의 이동이 필요하다.



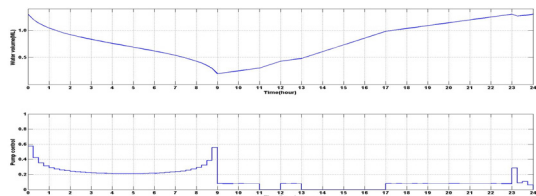
[그림 6] 수위레벨 기반 펌프운전 시스템
[Fig. 6] Flow rate based pump control system

그림 7은 기존의 펌프 동작에 사용되는 온-오프 방식을 사용하고 설정된 제어구간을 적용한 동작상태를 나타낸다. 경부하 시간대에 유입되는 유량에 대한 처리를 최대한 높여 중부하와 최대부하시간에 대한 제어구간의 펌프입력으로 사용함으로써, 중부하 시간대 동작은 최소화되고 최대부하 시간대 동작은 억제됨을 알 수 있다. 중부하 시간대 3구간에 각각 15분간 동작하여 사용량은 절감되었으나 전력피크값은 기존펌프운전과 동일하다.



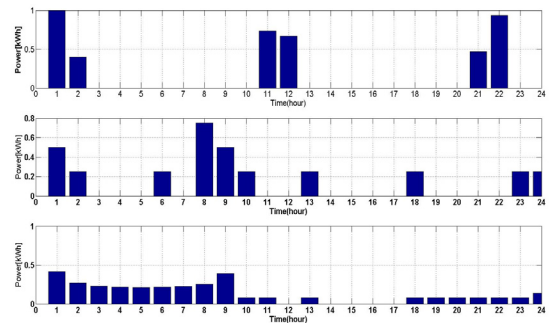
[그림 7] 최적화 구간 on-off 펌프제어
[Fig. 7] On/off pump control for horizon

그림 8은 중부하가 시작되는 09시에 유량 레벨을 하한치가 되게 설계하고, 최적화 구간에 입력으로 인가하였을 때의 결과이다. 중부하에서 부하사용량을 최소화 하여 유량의 분포를 완만하게 하여 마지막 경부하 시간대에 펌프 동작을 통해 유량을 초기화 시킨다.



[그림 8] 최적화 구간 가변 펌프제어
[Fig. 8] Variable pump control for horizon

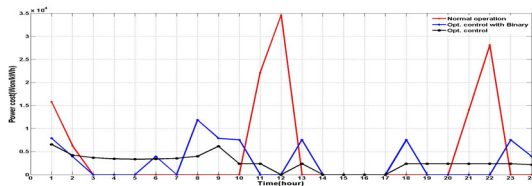
그림 9는 기존의 상한치와 하한치 기반의 펌프 운전 방식과 경부하 시간대에 예측된 입력을 중부하와 최대부하 시간대 제어구간의 온-오프 방식과 전력 가변방식스위칭 입력으로 사용한 결과를 1시간 단위로 전력사용량을 비교 한 것이다. 초기의 유량이 상한치로 설정하였기 때문에 펌프가 동작하여 유량을 외부로 보내게 되는데 기존 펌프운전 방식인 경우 하한치에 도달할때까지 펌프를 연속적으로 운전하여 최초의 1시간의 경우 최대치인 사용비율 1인 300[kWh]를 사용하게 되지만, 제한한 제어구간 설정 방식은 상한치와 하한치 구간 내에서도 동작하여 제어구간이 시작되는 중부하 시간대 09시부터 23시까지의 제어구간 전력사용을 고려하여 동작하게 됨으로 사용비율이 1이 아니다. 펌프운전 방식에 따른 1일 총 전력사용량은 각각 4.2×300 [kWh], 3.5×300 [kWh], 3.287×300 [kWh]으로 제안한 제어구간 펌프운전 방식이 사용전력량을 절감시키는 것을 확인할 수 있다. 또한 가변방식의 제어구간 펌프운전 방식은 전기요금 부과에 적용되는 피크전력값을 낮출 수 있음을 확인할 수 있다.



[그림 9] 펌프동작에 사용되는 전력 사용 비율
[Fig. 9] Power rate for pump operation

그림 10은 각각의 펌프운전 방식에 따른 전력사용 요금 절감에 대한 결과를 나타낸다. 기존의 펌프운전 방식은 시간대별 사용요금이 고려되지 않아 중부하 시간대 또는 최대부하 시간대의 펌프 운전됨으로써 순수 사용한 전력량에 비해 높은 요금이 부과됨을 알 수 있다. 각각의 펌프운전방식에 따른 전력사용 요금은 각각 120,928, 69,570, 61,815[원]으로 제안한 제어 구간 설정을 적용한 펌프운전의 경우 전기요금이 약 50% 정도 감소함을 알 수 있다. 이 결과는 전력요금 산정 시 전월 피크전력 사용값을 기준으로 기본요금이 책정되기 때문에

전력요금은 상대적으로 더 낮아질 가능성이 있다.



[그림 10] 에너지 비용 비교
[Fig. 10] Comparison of a energy costs

4. 결론

본 논문에서는 시간대별 요금체계 환경에서 펌프 운전 에 대한 제어구간을 설정하여 최적운전을 통한 부하분산 과 에너지 비용 절감 방안을 제안하였다. 중부하와 최대 부하 시간대의 펌프부하 사용에 대한 구간 설정하고 경 부하 시간대에 처리한 유량을 제어구간 입력으로 사용하 여 제한한 결과 기존의 상한치와 하한치 기반의 펌프운 전 방식에 비해 사용전력 대비 전력요금을 절감할 수 있 음을 확인하였다. 또한 펌프부하이동 방식의 경우는 요금 이나 최대전력 억제측면에서는 효과가 있으나 전체적인 순수 전력사용량에는 변화가 없으나 제안한 펌프운전 방 식은 순수전력 사용량을 절감하여 전체적으로 요금과 에 너지 사용을 절감할 수 있음을 확인하였다. 향후 경부하 시간대의 스위칭 시한을 감소시키는 알고리즘, 물 재사용 에 대한 수요에 대한 외부적인 영향 고려, 그리고 펌프장 치의 효율과 이송거리에 따른 영향 등을 고려하여 실제 시스템에 적용하게 되면 보다 효율적인 물재이용 처리시 스템 운전이 가능하리라 기대된다.

References

[1] Y. T. Kang and J. H. 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.

[3] X. Xia and J. Zhang, "Energy efficiency and control systems-from a POET perspective", CMTEE 2010, Vilamoura, Portugal, pp. 29-31, 2010.

[4] F. Vieira and H. M. Ramos, "Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water

supply systems", Renewable Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 928-936, 2009.

[5] M. Moradi-Jalal and B. 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.

[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.

[7] M. H. Afshar and 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] S.-W. Park, A Study on the Impact of Demand Response on the Generation Fuel Mix Under Real-Time Pricing, Master Thesis, Hongik University, 2011.

부 창 진(Chang-Jin Boo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 제주대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 제주대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 공과대학 첨단기술연구소 연구원

<관심분야>

에너지 효율, 접지시스템

김 호 찬(Ho-Chan Kim)

[정회원]



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

<관심분야>

신재생에너지, 풍력발전, 에너지효율