

단위 인버터 병렬운전에 의한 발전소 해수펌프 적용(I)

김수열, 류홍우
전력연구원

Studies on the application of unit-inverter parallel operation to sea-water lift pump in power plant(I)

Su-Yeol Kim, Hong-Woo Rhew

Korea Electric Power Corporation Research Institute

요약

발전설비의 대형화로 인하여 소내소비 전력량이 점점 증가하고 있는 추세이며 대용량의 화력발전소라 하더라도 기저부하보다는 부하조정의 역할이 강해져 정격속도로 운전하던 팬, 펌프등을 필요 부하에 따라 회전수를 제어하여 전력절감을 꾀하여야 할 필요가 있다[1]. 이에 따라 생산기술개발과제로 개발한 대용량 GTO 인버터 시스템을 서인천복합화력발전소의 3상 6600V 1500KW 용량인 전동기 구동 해수펌프에 적용하기 위한 기술적 검토 내용과 계산된 전력절감량을 제시하였다. 적용 시스템으로는 개발된 3상 660V 1MVA 단위 인버터를 병렬운전시켜 2MVA의 용량으로 하였으며 인버터의 입출력단에 변압기를 설치하여 강압 및 승압시켜 사용하였다[2].

서론

최근 화력발전소에 있어서 발전소 단위용량의 증대에 따라 보조 기기도 대용량화하고 이에 따른 소내 소비전력량도 증가하고 있다. 전기 에너지에 대한 매력은 사용하기 편리하고 안전하며 또한 깨끗하기 때문에 생활 수준의 향상과 더불어 그 수요가 증가하게 된다. 우리 나라의 경우 산업 선진화에 따른 생활 수준의 향상으로 최근 몇 년간 전력 수요의 증가율이 10%대 이상을 유지하고 있다. 이는 현재의 산업여건의 어려움과는 별개로 냉방수요가 주도하고 있어 당분간 전력 수요의 증가는 계속될 전망이다. 그러나 부존 에너지 자원이 부족한 우리 나라에서는 에너지 소비 증대에 따른 수입이 증대하고 있다. 이에 따라 에너지의 절대량의 감소는 어렵다하더라도 이의 증가율을 감소시키기 위한 노력의 일환으로 에너지절약 운동이 정부차원에서 꾸준히 진행되고 있을 뿐 아니라 녹색운동과 관련한 환경문제로 인하여 향후 에너지의 사용에 어려움이 가중될 것으로 생각된다. 따라서 전력 분야에 있어서의 절전기술 활용은 국

내 전력 요금과 연계시켜 검토할 때 투자비 회수가 가장 빠르게 나타나는 유도전동기의 속도제어 장치 활용이 매력적이라고 생각된다. 삼면이 바다로 싸여 있는 국내에서는 바닷물을 냉각수로 사용하기 위하여 많은 발전소들을 해변에 건설하여 운영하고 있다. 동해안이나 남해안의 경우에는 조수간만의 차이가 견딜만하기 때문에 발전설비에서 사용하기 위한 냉각수는 냉각수 펌프로 직접 바닷물을 양수하여 냉각수로 사용하고 있다. 그러나 서해안의 경우에는 조수간만의 차이가 심하여 1차적으로 바닷물을 저수로에 양수한 후 냉각수 펌프를 운전하여 필요한 곳에서 사용하고 있다.

이때 저수로에 양수하는 펌프를 해수펌프라고 하며 조수간만의 차에 의한 양수 수량의 변화에 따라 전력을 절감하기 위하여 서인천 복합화력 발전소의 경우 극수 변환 유도전동기를 이용하고 있다. 극수 변환 유도전동기는 3상 6600볼트 1500KW로 고압 대용량이고, 이를 극수 변환 유도전동기로 제작 사용하는 것은 가격 상승뿐 아니라 잦은 극수변환 운전으로 고장발생도 증가하는 등 어려움이 따르고 있다. 서인천 복합 화력의 경우 극수변환 전동기를 이용하고 있음에도 조수간만의 차에 의하여 밀물일 경우에는 양수 수량이 많아 저수로를 넘쳐 다시 바다로 흘러들고 있어 에너지 낭비가 나타나고 있다. 또한 서인천복합화력발전소의 경우 전력계통의 수요변화에 따라 발전기 운전대수 변화가 심하여 필요 수량의 형태가 거의 연속적으로 변화하고 있다. 따라서 양수량을 해수위의 변화와 수요량의 변화에 따라 적절히 조절할 경우 에너지의 절감이 가능하다. 이에 근거하여 해수 펌프 구동 유도전동기에 속도제어장치를 사용하여 양수한 해수가 저수로를 넘치지 않도록 저수로의 수위를 적절히 조절할 경우 에너지를 절감할 수 있다. 나아가 현재 1년에 1-2건 과대 토크로 발생하는 축파손이나 기타 절연 파괴 현상을 예방할 수 있을 것으로 기대된다. 사용 유도전동

기 속도제어 장치는 1MVA 단위 인버터를 2대 병렬 운전하는 시스템으로 개발하여 적용하는 것으로 하였으며 적용방법, 속도제어 방법 그리고 적용에 따라 예상되는 절전량을 계산하였다.

펌프의 제어별 특성

(1) 유량제어

일반적으로 사용하는 유량제어는 그림1의 조정밸브에 의한 유량제어에서 보는바와 같이 펌프 출구 측에 설치된 조정밸브를 사용하여 유량을 제어하여 왔다. 이 경우에는 조정밸브가 완전히 열린 상태에서는 밸브에서 손실이 발생되지 않지만 소요 유량의 저하로 조정밸브를 닫을 경우 조정밸브에서 판의 통로를 줄이게되어 스톱 손실(Throttle Loss)이 발생하게된다. 그러나 그림 1의 인버터 제어 방식에서와 같이 펌프를 직접 속도제어할 경우에는 스톱 손실이 발생하지 않기 때문에 이 손실을 회수할 수 있다. 이와 같이 속도제어를 적용할 경우에는 일반적으로 유량(Q), 유압(H), 동력(P)의 상호관계에서 유압은 유량의 2승에 비례하고 동력은 유량의 3승에 비례하여 변화하기 때문에 유량이 줄어들면 들수록 조정 밸브 제어 방식에 비하여 크게 절전을 행할 수 있다[1]

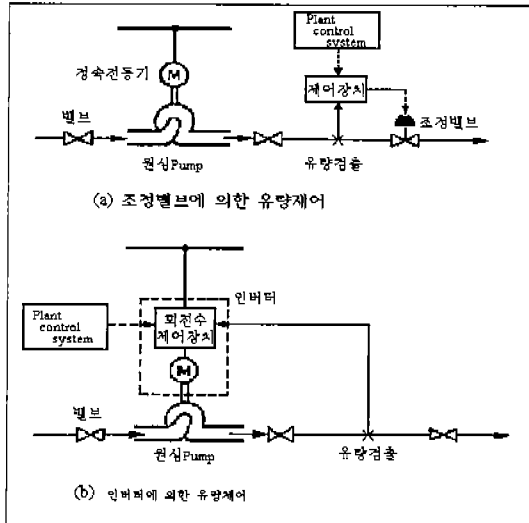


그림 1 유량제어 블록도

(2) 유량을 제어하지 않을 경우와 속도제어 경우

양수 수두의 변화가 있음에도 필요 유량이 일정할 때 펌프를 일정속도로 운전하는 경우와 속도제어를 이용하여 일정 필요유량으로 제어하는 경우에 대하여 계산한 소요동력에는 차이가 있다.

양수 수두의 변화에도 불구하고 펌프를 일정속도로 운전할 경우에는 그림 2에서 알수 있는 바와 같이 수두의 크기에 따라 양수량이 변화하게 된

다. 따라서 일정속도 펌프를 수두 변화가 있는 곳에 채용할 경우에는 최대 양수 수두에서도 필요한 유량을 공급할 수 있는 능력을 가진 펌프를 선정하여야 한다. 이 경우 최대 양수 수두에서는 필요 유량을 공급하지만 양수 수두가 낮아지면 그림 2의 펌프 특성곡선에서 양수 유량은 증가하게 되어 결국 흘러 넘치게 되고 이것이 에너지의 낭비를 가져오는 요소가 된다. 그러나 양수 수두 변화에 따라 펌프의 속도를 제어하여 필요 유량을 일정히 공급하는 경우에는 양수된 물이 흘러 넘치지 않게 되어 에너지를 절감할 수 있게 된다.

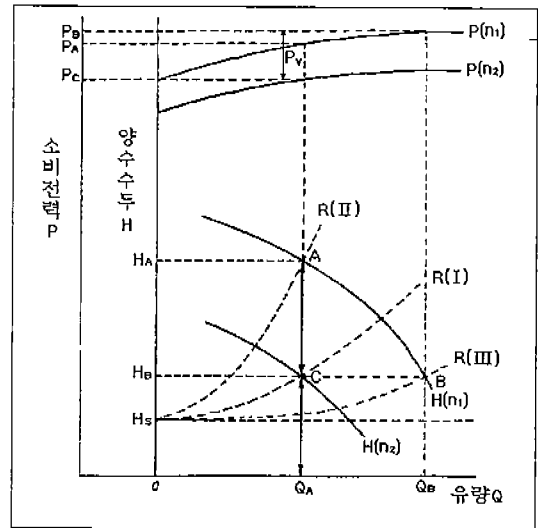


그림 2 유량제어 특성곡선

○ 제어하지 않을 경우의 소비전력

그림 2에서 Q_A 의 유량을 필요로 하는 시스템에서 일정 속도의 펌프를 사용하고 조정밸브를 사용하지 않는 경우에는 최대 수두가 H_A 라면 이때 필요한 소비전력은 $P(n1)$ 의 전력곡선으로부터 P_A 를 구할 수 있다. 이를 해수면에 적용할 경우에는 쓸물 때로 생각할 수 있으며 양수해야할 수두가 높아진 경우이다. 만약 양수 수두가 H_B 로 변화하여 H_A 에 비하여 낮아진 경우에 양수되는 유량은 펌프 속도가 일정하므로 펌프 특성 곡선인 $H(n1)$ 의 곡선을 따라 변화하여 B점에서 운전점이 결정되고 유량은 Q_B 가 된다. 이때는 해수면이 높아진 경우로서 밀물 때와 같고 유량 Q_B 는 시스템에서 필요로 하는 유량보다 많아지게 되고 불필요한 유량은 다시 바다로 흘러들게 된다. 따라서 유량제어장치가 없을 경우 유량은 양수 수두가 낮아짐에 따라 Q_A 에서 Q_B 로 증가하게 된다. 이로 인하여 소요전력도 $P(n1)$ 의 곡선을 따라 변화하여 P_B 가 된다. 이 경우 실제 필요한 유량은

Q_A 인데도 불구하고 수두의 저하로 Q_B 가 공급되고 시스템에서 필요로 하지 않는 유량 $Q_V (= Q_B - Q_A)$ 만큼 더 공급되게 된다. 이때의 필요 이론 동력은 $P_B = KQ_B H_B$ 가 된다.

○ 회전수 제어에 의한 유량제어

회전수제어를 하게되면 그림 2의 A점에서 운전중 필요 유량 Q_A 의 변화없이 양수 수두가 저하할 경우 펌프의 속도를 저하시켜 펌프의 특성 곡선을 $H(n1)$ 에서 $H(n2)$ 로 변화시킨다. 이에 따라 펌프의 운전점을 A점에서 C점으로 이동시켜 동일한 유량으로 일정하게 운전되도록 한다. 수두가 저하함에 따라 필요한 소비전력도 P_A 에서 P_C 점으로 이동하게 된다. 이때의 필요 이론 동력은 $P_C = KQ_A H_B$ 가 된다.

○ 전력절감

소요전력의 차이 즉 전력절감의 크기를 구하면 $P_V = P_B - P_C = KH_B(Q_B - Q_A)$ 가 된다.

인버터 시스템의 구성

인버터 시스템의 구성은 인버터 고장에 대비하여 기보유하고 있는 직입기동 정속도 운전 방식도 사용 가능토록 그림 3과 같이 구성하였다. 그림 3에서 알수 있는 바와 같이 유도전동기 속도제어 장치인 인버터는 입력단에 인버터 정격입력 전압에 맞도록 입력변압기가 연결되어 있다. 출력단에는 다시 인버터의 출력전압을 최대 운전 조건에서 전동기 정격 전압에 맞도록 출력변압기를 설치하였다. 이는 개발된 GTO의 단위 인버터 정격전압이 3상 660볼트로 설계 제작되어 전동기의 정격인 3상 6600볼트에 일치하도록 하기 위해서다.

전 시스템 용량은 2MVA로 되어 있으나 그림 3에서와 같이 1MVA 용량의 단위 인버터 2대를 병렬로 연결하여 운전되도록 하였다. 정류부인 콘버터는 다이오드를 사용하여 전파 정류하였으며 정류된 출력전압은 공통 직류링크부 모선에 연결되도록 하였다. 입력변압기 결선은 각각 $\Delta-\Delta$, $\Delta-Y$ 로 하여 2차측이 Y, Δ 연결로 입력고조파를 줄일 수 있도록 설계되어야 하나 서인전복합화력에서는 이를 반영하지 못하였다[2].

정류부인 콘버터의 전류평형 운전을 위하여 각 정류부 입력단에 리액터를 삽입하여 활용하였다. 그리고 입력반, 정류반, 인버터반, 변압기반, 차단기 패널등으로 구성되는 시스템 설계로 입력케이블과 직류링크부 모선 길이를 동일하게 설계하도록 하였다.

인버터 입력측에는 차단 능력을 가진 진공차단기를 사용하였으나, 출력측에는 차단능력이 필요 없으므로 진공전자절촉기를 사용하여 투자비를 줄였다.

사용된 1MVA 단위 인버터는 전압형으로 LG산 전연연구소와 공동개발하여 적용시험을 수행한 시스템으로 전동기의 용량에 따라 단위 인버터를 3병렬 구성하여 3MVA 까지 운전 가능토록 개발 하였다.

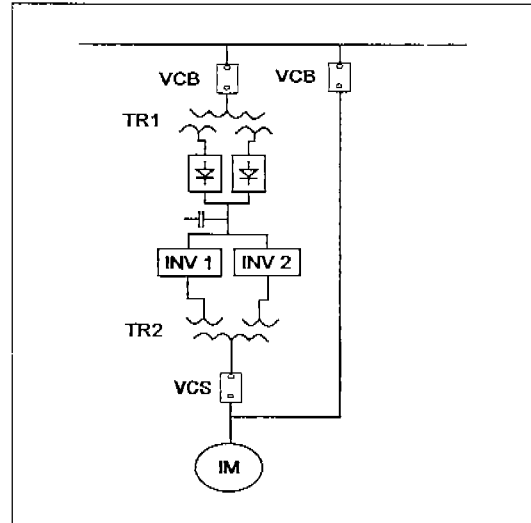


그림 3 인버터의 구성

제어 시스템 구성

제어 시스템은 그림 4와 같이 구성하였다. 유량의 제어보다는 최종제어 목적이 저수로의 수위임으로 유량을 일정하게 유지한다는 것은 저수로의 수위를

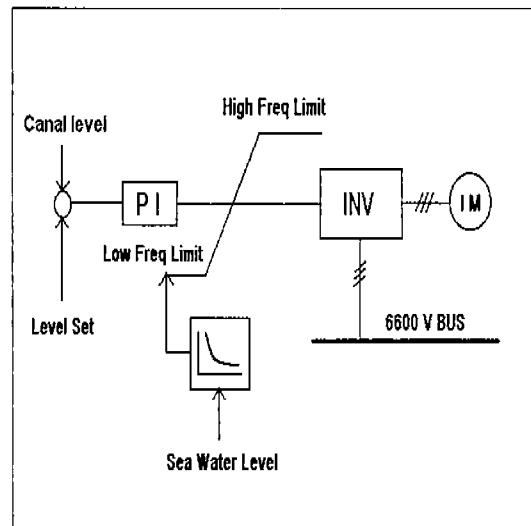


그림 4 제어 시스템 구성

일정히 유지하는 것이 됨으로 저수로 수위를 측정하여 사용하였다.

저수로의 수위는 인버터 적용 전동기의 속도제어

로 이루어 지는데 회전수는 양수 가능한 최저 운전 주파수 이상에서 운전할 수 있도록 구성되어 있다. 그리고 해수면의 수위를 측정하여 인버터의 최저 운전 주파수를 결정하도록 하였는데 이는 해수면에 의한 수두의 변화에 따라 양수할 수 있는 최저 속도가 다르게 됨으로 이 최저 운전 주파수를 수두의 변화에 따라 변경시켜야 하기 때문이다. 만약 최저 주파수를 잘못 설정하여 펌프가 양수하지 못하고 계속 운전된다면 펌프 날개와 물의 마찰로 인하여 온도가 상승하게되어 펌프 소손의 우려가 있다. 다음 표 1에 보이는 것은 해수 수위별 펌프가 양수할 수 있는 최저 운전주파수의 계산 값이다.

그림 5는 서인천복합화력발전소에서 사용중인 해수펌프의 특성곡선이다. 그림 5에서 원으로 그려진 부분이 각각 16극과 18극의 전동기 구동 펌프의 설계 운전점이고, 이때의 유량은 28050[m³/hr]이다.

해수위 9[m]에서 16극 전동기 구동 펌프는 양수 유량 28050[m³/hr], 수두 14.5[m]에서 운전되었다. 그림 5의 저항곡선을 참조하면 해수위 9[m]에서 양수 유량 1000[m³/hr]인 저항곡선(system curve)상의 수두가 대략 13.5[m]임을 알 수 있다. 이로써 양수량 1000[m³/hr]일 때 양수 수두와 해수위와의 관계를 풀 1과 같이 환산할 수 있다. 즉 양수 유량 1000[m³/hr]일 때 해수위가 9[m]이면 양수 수두는 13.5[m]이다. 원점에서 양수 수두 13.5[m], 양수량 1000[m³/hr]를 통과하는 저항곡선을 기준으로 16극 전동기 60Hz운전시의 펌프 특성곡선과 만나는 점이 29[m]임을 알 수 있다. 단 여기서 양수 유량이 1000[m³/hr]인 운전 점을 최저 운전 주파수로 가정했으며 양수 가능 수

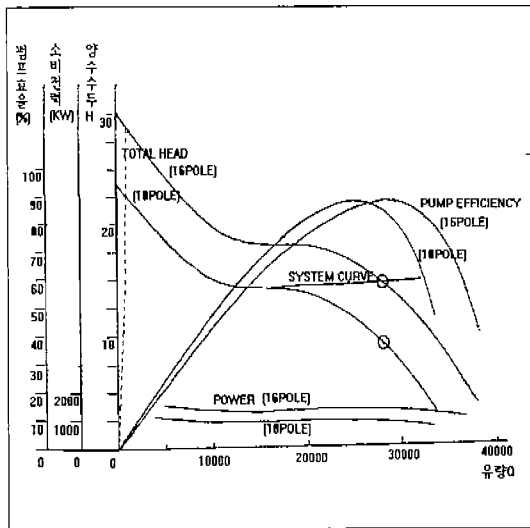


그림 5 펌프 특성 곡선

두의 크기가 펌프 회전 속도의 제곱에 비례하는 관계 식 (1)을 이용하여 최저 운전 주파수를 계산했다.

$$\text{최저운전주파수} = 60 * \sqrt{\frac{\text{수두}}{29}} \text{ ----식 (1)}$$

표 1. 해수 수위별 양수 가능 주파수

수위	8	9	10	12	14	15
수두	14.5	13.5	12.5	10.5	8.5	7.5
주파수	42.4	40.9	39.4	36.1	32.5	30.5

적용시의 전력 절감량

유량을 제어하지 않을 경우와 속도제어를 사용하여 유량을 제어할 경우에 대하여 적용하며 이 계산의 전제조건으로는

- 설계점인 설계 수두는 14.5m 설계유량은 28050 m³/hr인 점에서는 절감량 없음.
- 썰물과 밀물이 1일 4회(밀물 2회, 썰물 2회) 발생
- 조수간만의 차에 상관없이 발전소에서 사용하는 냉각수는 저수로에 양수된다
- 속도제어에 의한 양수시 저수로의 수위는 일정 수위로 제어한다.
- 펌프 운전 시간과 수두의 변화는 계산의 편의를 위하여 그림 6과 같이 모의한다.
 - 밀물과 썰물이 일일 각각 변화하지만 하루 밀물과 썰물이 각각 2회정도 있다고 가정한다.
 - 따라서 밀물때부터 썰물때까지 썰물때부터 밀물때까지를 1회의 변화로 하면, 하루 총 4회의 변화가 있다.
 - 따라서 하루 1회 해수위 변화 시간은 6시간이고, 수두 변화를 시간대 별 평균수두로 간이화하여 수식 계산에 이용한다.
- 필요 유량은 펌프의 설계점인 28050m³/hr 으로 하고 해수면의 변화에 따라 28050m³/hr에서 30500m³/hr로 변화하고 펌프의 효율도 이에 따라 감소하게 된다.

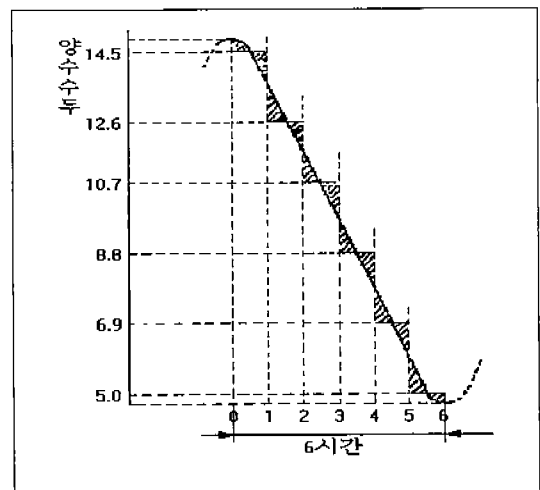


그림 6 해수면의 변화

또한 검토 조건에서 현재 운용 중인 극수 변환 운전 방식을 고려하였다. 이는 수위의 변화에 따라 유량이 증가하게 될 경우 극수를 변화시켜 저속 운전 하여도 설계 유량을 만족시킬 경우에는 변환된 극수에 대한 전동기 운전특성을 고려하였다.

표 2는 1대의 극수변환방식의 전동기로 펌프를 운전할 경우의 구동전력을 나타낸 것이다. 펌프의 설계점인 수두 14.5[m] 유량 28050[m³/hr]을 기준으로 수두의 변화에 따른 유량변화를 식 (2)를 이용하여 계산한 것이다.

$$P = 9.8 Q H / (n_f \cdot n_m) \quad \text{----- (2)}$$

표 3은 일정 유량을 양수하고 있는 인버터 적용 전동기 구동 펌프의 수두 변화에 따른 속도변화시의 구동전력이다. 그림 5에 펌프의 효율을 보였고 전동기의 효율은 표 4와 같다.

표 2. 유량 제어하지 않을 경우

수두(m)	유량 (m ³ /hr)	펌프 효율(%)	전동기 효율(%)	구동전력 (kW)
14.5	28050	87	94	1388
12.6	30750	86	93.5	1345
10.7	32250	83	93.5	1211
8.8	28800	81	93.5	916
6.9	30500	72	93	855
5.0	32000	62	92	783

표 3. 속도 제어방식

수두(m)	유량 (m ³ /hr)	펌프 효율(%)	전동기 효율(%)	구동전력 (kW)
14.5	28050	87	94	1388
12.6	28050	87	93.5	1212
10.7	28050	87	93.5	1030
8.8	28050	87	93.5	847
6.9	28050	87	93	667
5.0	28050	87	93	460

표 4. 전동기의 효율과 역률

	역률		효율	
	16극	18극	16극	18극
전부하	0.78	0.74	0.94	0.935
3/4부하	0.72	0.68	0.93	0.925
1/2부하	0.60	0.56	0.91	0.902

유량 제어 하지 않을 경우와 속도제어로 유량제어 하는 경우의 전력절감량은 표 5와 같다. 표 5의 셈은 밀물과 썰물 1회의 계산이므로 하루의 전력절감량은

4차례의 수두 변화가 있으므로 수두당 절감전력에 운전시간 4시간을 곱하면 3576[Kwh]가 된다.

표 5. 절감량

수두 (m)	정속 운전(Kw)	인버터 운전(Kw)	절감 (Kw)	운전 시간(Hr)	일일계 (Kwh)
14.5	1388	1388	-	4	-
12.5	1345	1212	133	4	532
10.7	1211	1030	181	4	724
8.8	916	847	69	4	276
6.9	855	667	188	4	752
5.0	783	460	323	4	1292
계	-	-	-	24	3576

계산결과

수두의 변화에도 불구하고 유량을 제어하지 않는 기존 운전방식과 속도제어를 행하여 유량을 제어할 경우의 필요동력의 차이를 계산하였을 때 기존방식의 경우 하루 필요한 동력은 25992KWh이고 속도제어를 할 경우 21416KWh로 그 절감량은 약 14%인 3576KWh이다. 따라서 연간 360일 운전할 경우 총 절감량은 1,287,360KWh에 달한다.

결론

인버터 적용 대상(기존 밸브제어, 극수변환제어, 부하 등), 운전 조건에 따라 절감되는 전력의 양은 차이가 있겠지만 펌프 부하에서는 정격 부하 미만에서는 상당한 절감효과가 있다는 것이 증명되었다. 지속적인 전력 소자의 가격 하락으로 설비의 가격이 저렴해지고 있으며, 에너지 가격은 상승 추세에 있어 경제성 평가는 계속 유리해 진다고 전망된다. 향후 인버터의 신뢰성이 계속 보완되어 해수펌프 같은 부속설비가 아닌 주 설비로의 적용이 검토되어 전력절감에 크게 기여할 것으로 기대한다.

참고문헌

1. TOSHIBA CORPORATION “교류인버터의 적용에 관한 기술보고서”, 1982. 1. 15.
2. 생산기술개발과제 “7.2KV급 유도전동기 속도제어 시스템 개발” 보고서 전력연구원 1995. 2.
3. 장승직 역 “인버터 응용 매뉴얼” 도서출판 기다리