

단위 인버터 병렬운전에 의한 발전소 해수펌프 적용(II)

김수열, 류홍우
전력연구원

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

Su-Yeol Kim, Hong-Woo Rhew

Korea Electric Power Corporation Research Institute

요약

서인천복합화력발전소의 해수펌프를 속도제어하여 소내 소비 전력을 절감하고 전동기의 직입기동에 의한 스트레스를 줄이기 위하여 생산기술개발과제의 연구개발품 2MVA GTO 인버터를 실증 적용하였다. 적용 시스템은 단위 인버터 병렬운전으로 인버터의 입력측은 병렬다중 방식, 출력측은 직렬다중 방식으로 설계했다. 인버터에 의한 운전 자료를 기준으로 소비전력을 산정하여 비교하였으며 그 적용 방법과 결과를 보인다[1][2].

서론

발전소 보조 기기중의 하나인 해수 펌프(Sea Water Lift Pump)를 구동하는 유도전동기에 전력 절감을 위하여 유도전동기 속도제어 장치인 인버터를 적용하였다. 해수 펌프는 서해안의 조수간만의 차로 인하여 발전소 복수기의 냉각수로 사용될 해수를 1단계 양수하는데 사용되는 펌프이다. 이 펌프에 의하여 양수된 해수는 복수기의 순환수 펌프에 의하여 터빈에서 배기되는 증기를 복수시키기 위한 냉각수로 사용된다. 동해안이나 서해안의 경우 조수 간만의 차이가 있더라도 순환수 펌프만으로 충분히 냉각수를 양수하여 복수기에 사용할 수 있으나 서해안의 경우 조수간만의 차이가 9미터 정도로 순환수 펌프만으로는 해수를 양수하여 냉각수로 사용할 수 없기 때문에 1차적으로 해수 펌프를 이용하여 저수로에 양수하고 양수된 해수를 순환수 펌프가 냉각수로 사용하게 된다. 서인천 복합화력의 경우 해수펌프는 극수 변환으로 조수간만의 차에 따른 수두의 변화에 대응하여 운전하고 있으나 속도의 연속제어가 불가능하여 수두의 일정 변화 범위에서는 양수된 해수가 저수를 넘쳐 다시 바다로 흘러가게 된다. 따라서 조수간만의 차에 의하여 넘쳐흐르는 해수량만큼 에너지가 낭비되고 있으며 특히 시각적인 낭비가 심한 것처럼

보이는 것 또한 문제점으로 나타나고 있었다. 그리고 지역의 특수조건으로 인하여 갯벌이 유입하게되고 이로 인하여 전동기의 축이 파손되거나 과부하 기동 정지 회수의 증가에 따른 열화의 진척으로 전동기의 고장이 증가되고 있는 현상이다. 이러한 문제를 근본적으로 해결하고 절전을 도모하기 위하여 유도전동기에 속도제어 장치인 인버터를 사용하였다. 속도제어 장치는 정부의 생산기술개발과제로 추진되었으며 1 MVA 단위 인버터를 병렬운전하여 최대 3MVA 까지의 전동기에 적용 가능하나 서인천 복합화력의 해수펌프 구동용전동기가 3상 6600V 1500KW 용량으로 1MVA 단위 인버터를 2 병렬운전하도록 설계하였다. 적용 시스템과 제어 시스템의 구성은 동시 발표 예정인 "단위 인버터 병렬운전에 의한 발전소 해수 펌프 적용(I)" 논문에 기록되어 있으며 절전가능량도 포함되어 있다.

본론

유도전동기의 속도 제어를 위해서는 주파수를 가변시킬 수 있는 인버터가 필수적인데 현재까지 개발된 반도체 스위칭소자들은 전압, 전류 정격이 정해져 있기 때문에 인버터의 용량을 증대시키는데 한계가 있다. 인버터의 용량을 한계이상으로 증대시키기 위해서 여러개의 전력용 반도체를 직렬 또는 병렬로 연결하여 인버터의 용량을 키우기도 하나 스위칭시 반도체 소자에 전압이나 전류의 무리가 따를수 있어 부가적인 하드웨어가 추가되어야 하는 문제가 발생한다. 용량별로 각각의 독립된 제품을 구비하여야 하므로 제조공정의 표준화가 어렵고 대량 생산에 따른 생산비 인하가 어렵다. 따라서 대용량 인버터를 한대로 구성하는 경우보다 여러대로 구성하면 원하는 용량을 구현하기 위해서 단위 인버터의 대수만을 조정하면 되므로 단위 인버터를 표준화해 양산하면 생산성 및 가격

경쟁력이 향상 될 것으로 기대된다[2].

1. 인버터 병렬운전의 구분

서인천 복합화력발전소에 설치한 2MVA 인버터는 그림 1과 같고 1MVA급 단위 인버터 2대의 병렬운전으로 구현하였다. 인버터의 다중방식으로는 입력측을 기준으로 보았을 때, 병렬다중방식과 직렬다중방식으로 구분할 수 있다. 병렬다중 방식의 경우는 수대의 단위인버터가 하나의 직류링크를 공유하고 있어 직류링크측의 전해 콘덴서가 큰 값을 가져야 하고 그 동작 전압도 커야 한다. 또 각 단위 인버터가 PWM을 수행할 경우 리플전류분이 계속 직류링크 콘덴서로 유입, 방출되므로 직류링크 콘덴서의 리플용량이 커야 한다.

직렬다중 방식의 경우에는 수대의 단위 인버터가 하나의 직류링크를 균등히 분압하고 있어 기본적으로 직류링크 전압이 단위 인버터의 대수에 비례하여 증가하여야 한다. 직류링크 전압을 높게 설정하려면, 정류기의 전압용량이 높아져야 한다. 직류링크측의 전해콘덴서가 병렬다중 방식만큼 큰 값을 가질 필요는 없다.

입력측이 직렬다중 방식으로 결선되면 병렬 수만큼의 직류링크 콘덴서 뱅크의 공간 확보 문제, 부스바의 적정한 배치 설정 등의 어려움이 있다. 인버터 출력측이 병렬다중 방식으로 결선되어 있는 상태에서 직렬다중 입력 방식의 직류링크측 전압 밸런스가 유지되지 않으면 - 각 단위 인버터는 서로 다른 스위칭상태를 가지고 PWM을 수행하므로 - 인버터 출력의 기본파 성분의 크기가 달라져 순환전류문제를 야기한다. 따라서 전압형 인버터를 채용할 경우 인버터 입력측 기준으로는 병렬다중 접속방식이 유리하다[2].

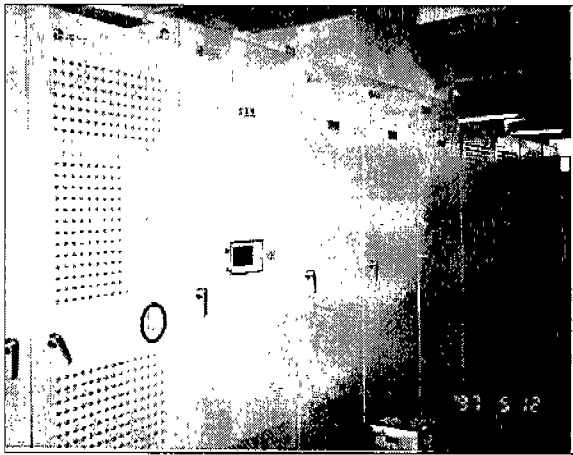


그림 1 서인천복합화력발전소 적용 인버터(2MVA)

출력측을 기준으로 보았을 때도 입력측 기준으로 보았을 때와 마찬가지로 병렬다중 방식과 직렬

다중 방식으로 구분할 수 있다. 병렬다중 방식은 전류를 배가시키는 방법이고 직렬다중 방식은 전압을 배가시키는 방식이다. 전압형 인버터의 경우에는 스위칭상태에 따른 순환전류 문제로 인하여 병렬다중 방식보다 직렬접속 방식을 채택함이 유리하다.

2. 인버터의 병렬운전

1대의 단위인버터를 병렬운전하는 경우에 독립적으로 발생할수 있는 전압의 가지수는 7이고, 이 7개의 전압벡터를 적절히 조정하므로써 원하는 전압이 생성될수 있도록 PWM을 수행한다. 한편 2대의 인버터를 병렬로 연결하여 운전할 경우 선택할 수 있는 독립적인 전압 벡터의 가지수는 19로 증가한다. 그림 2는 2대의 인버터를 병렬운전할 경우의 전압벡터도이다.

그림 3은 공간벡터 PWM인버터의 2대 병렬운전시 시스템 회로도이다. 입력측은 병렬접속 방식, 출력측은 직렬접속 방식을 채택하였다. 입력측은 정류기 2대의 출력을 병렬로 DC bank측에 연결하였다.

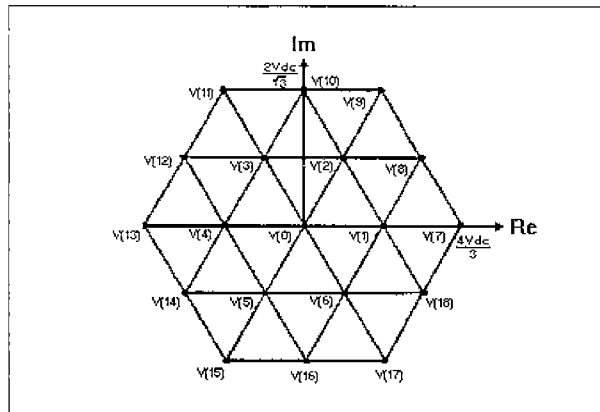


그림 2 인버터 2대 병렬 운전시의 전압 벡터도

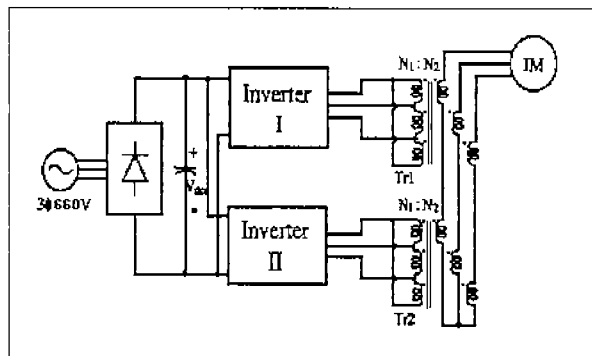


그림 3 시스템 회로도

3. 인버터의 고장진단 및 보호동작

인버터의 고장 발생시 2차적으로 발생할 수 있는 사고를 방지해야 하며, 고장 부위를 신속하게 진단하는 것이 필요하다. 따라서 본 장치에서는 정상운전을 시작하기 전에 시스템의 각 부위를 순차적으로 시험하여 고장 유무를 진단하고, 고장 발생시 고장 부위를 정확하게 액정화면을 통하여 나타내도록 하였으며, 정상적인 경우에만 운전을 시작하여 2차적인 사고를 방지하도록 설계하였다.

인버터가 운전중 고장이 발생하면 보호동작이 작동하도록 설계되었으며, 주요 고장의 원인으로는 과전압, 부족전압, 과열 및 각종 부품의 고장 등이 있다. 일단 고장이 발생하면 시스템을 정지시키고 고장 발생시의 전류, 전압, 시각, 주파수 등의 데이터를 저장하였다가 사용자가 볼수 있도록 액정화면으로 표시해 준다.

4. 제어시스템의 구성과 정정

제어시스템의 구성은 그림 4와 같고, 저수로의 수위(목표치) 6.2m를 넘지 않도록 명령치를 6.2로 입력하였다. 한편 펌프 속도제어 범위의 하한치는 최소 양수 가능한 운전점이 되어야 하고, 해수변화에 따른 양수 수두의 변화에 따라 최저 유량 운전점이 변화한다.

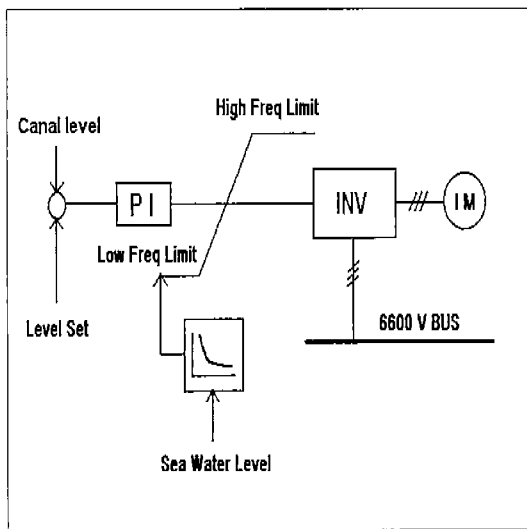


그림 4 제어시스템 구성

인버터의 최저운전 주파수를 설정하기 위하여 인버터를 해수면의 수위변화에 따라 실계통 운전을 수동으로 수행하면서 측정하였다.

양수량은 측정장치가 없기 때문에 정확한 측정이 곤란하여 시각적으로 양수량을 최저 양수량으로 목측하고 이를 기준으로 하여 작성하였다. 따라서 그림 4의 제어시스템에서 해수면의 변화에 대한 신호를 기준으로 최저 주파수를 결정하는 자료

는 표 1의 값으로 결정하였다.

표에서 표시하고 있는 수위는 수위측정장치에서 출력되는 신호로 그 크기는 양수 수두와는 반대의 개념을 가지고 있다. 즉 밀물때 양수 수두는 감소해 가지만 수위는 상승하고 썰물때 양수 수두는 증가하지만 수위는 감소한다.

표 1. 수위에 따른 입력된 최저 주파수

수위[m]	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
최저주파수	48	45	43	41	39	37	35	33	32	30	27

표 2는 계산에 의한 양수가능 주파수이고, 그 계산식은 다음과 같다.

$$\text{전동기 입력 주파수} = 60 \times \sqrt{\frac{\text{수두}}{29}}$$

윗 식에서 양수 수두 29[m]는 전동기 입력주파수 60Hz일 때 유량 1000[m³/hr]를 양수하는 수두이다. 계산에서는 이 유량을 최저 유량으로 가정하였다.

표 2. 계산식에 의한 양수 가능 최저 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

실 운전 설정치가 계산에 의한 최저 주파수와 약간의 오차가 존재 하나 이는 특성곡선 상의 관로의 저항곡선과 실제 유체 저항과의 오차에서 기인한것으로 생각한다.

기동 주파수는 1.5Hz에서부터 기동 시작하여 2Hz까지 기동 토크를 가하여 기동 완료하고 V/F 제어에 의해 필요 유량 양수 속도까지 증가시킨다.

PI게인의 P값은 저수로의 수위 오차 0.2m에 대하여 52Hz까지 운전할수 있도록 하였고 I게인 값은 0이다. 저수로의 유량 조절은 수대의 전동기를 운전시켜 수위 제어하고 있는데 기본적으로 필요 유량에 근사한 유량을 극수 변환 방식의 전동기 구동 펌프로 공급하고 그 차이만큼을 인버터 적용 전동기로 제어하고 있다. 이 경우 극수 변환 방식 운전에는 운전자의 판단에 따라 여러 가지 경우가 있을 수 있고, 또 적용 장소가 복합화력발전소이기 때문에 발전기 유니트의 기동 정지가 빈번하고 해수위의 계속되는 변화 등 다변수 시스템으로서 I게인 값을 찾기가 거의 불가능하다. 또한 저수로의 저장량이 커 얼마간의 정상상태 오차라는 것이 큰 의미를 갖지 않기 때문에 P게인 만을 설정하였으며 실제로 저수로의 수위를 무리없이 제어하고 있다.

5. 전력절감

기존방식의 서인천복합화력발전소 해수펌프 운전은 16극과 18극 전동기의 극수 변환방식에 의해 유량을 제어하고 있으며 유량제어에 관한 뚜렷한 기준은 없고 각각의 상황에 따라 운전자의 판단에 의지하여 유량제어 되고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 16 극 전동기 구동 수두 H_A , 유량 Q_A 에서 운전중인 펌프가 해수위의 상승으로 저항곡선이 R1에서 R2로 변화하면 수두는 H_B 로 변하게 되고 양수유량은 시스템의 필요 유량 Q_A 을 넘어서 Q_B 로 운전된다. Q_A 와 Q_B 의 차의 유량 만큼 저수로에

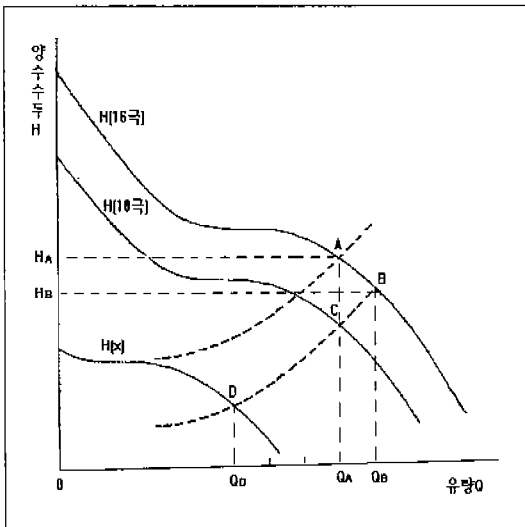


그림 5 유량제어 특성곡선

서 넘쳐흘러 에너지의 낭비가 계속되면 운전자는 전동기를 18극 전동기 구동으로 전환하여 유량을 Q_A 와 유사한 값으로 계속 운전되게 한다. 결국 수위의 변화에 따라 발생하는 손실 유량을 현재의 극수 변환방식으로서 일부만 개선할 수 있다. 이에 따라 16극 전동기에 인버터를 적용하여 전동기의 속도변화에 의해 저수로 일정 수위 제어를 하게 되었다.

서인천 복합화력발전소 해수 펌프는 7대가 준비되어 있으며 이중 현재 운전 가능 펌프는 4대이다. 인버터를 적용한 전동기 구동 펌프의 전력절감의 원리를 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 시스템 설계 유량 운전점 A에서 동작하던 4대의 펌프가 해수위의 변화로 운전점이 B로 이동하면 양수량은 $4(Q_A - Q_B)$ 만큼 많은 양이 양수되어 바다로 넘쳐 흐르게 되고 에너지의 낭비를 가져온다. 이때 16극 전동기 1대를 18극으로 극수 변환하게 되면 C점으로 이동하여 한대의 양수량은 다시 Q_A 로 이동하여 양수하게 되나 16극 전동기 3대는 여전히 Q_B 로 양수하게 되어 이때는 $3(Q_A - Q_B)$ 만큼 여전히 많은 양

이 양수되게 된다.

16극 전동기 1대를 속도제어 할 경우에는 양수 수두가 H_A 에서 H_B 로 이동하였을 때 16극 전동기의 속도를 저하시켜 총 양수량이 식 (1)을 만족시키도록 한다.

$$4Q_A = 3Q_B + Q_D \text{ ----- 식 (1)}$$

즉 16극 전동기의 속도는 저하되어 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 $4(Q_B - Q_A)$ 만큼 줄어든 속도인 $H(X)$ 의 속도에서 운전토록 제어하면 된다. 이때 1대의 극수변환에 비하여 절감되는 에너지는 K를 상수라고 할때 식 (2)와 같음을 알 수 있다.

$$P = KH_B (Q_A - Q_D) \text{ ----- 식 (2)}$$

서인천복합화력발전소의 해수펌프와 전동기 사양은 다음과 같다.

펌프

유량 : 28050[m³/hr]

수두 : 14.5[m]

RPM : 443/394(16극/18극)

효율 : 87[%]

전동기(16극/18극)

정격전력 : 1500/1050[KW]

정격전압 : 6600[V]

전부하전류 : 179/132.8[A]

입력 : 3상 6900V 60Hz

현재 서인천복합화력발전소에서의 취득 자료는 다음의 표 3과 같다.

표 3. 해수펌프 구동 전동기 운전 자료

시간	해수	저수로	501	101	201	701	비고
			Kw	Amp.			
13.30	11.16	6.06	910	156	114	152	5/12
14.30	10.3	6.08	780	158	153	156	
15.30	10.54	6.05	800	157	152	154	
16.30	11.7	6.14	440	153	112	152	
17.30	13.1	6.1	410	150	118	148	
09.20	16.4	6.3	220	108	104	134	5/13
10.45	15.5	6.26	250	110	106	139	
11.30	14.6	6.12	430	111	107	140	
12.30	13.3	6.1	520	113	110	145	
15	10.83	6.08	820	157	153	150	
16	11	6.07	580	156	152	151	

위의 자료로부터 전력절감을 셈하기 위해서 같은 양을 양수함에 있어서 인버터를 적용한 시스템과 극수변환방식만에 의한 소비전력을 산정하여 비교하면 표 4와 같다.

표 4. 인버터 적용 전과 후의 비교

해수[m]	인버터 적용 후[KW]	인버터 적용 전[KW]	차 [KW]
11.16	4739	4823	84
10.30	5078	5359	281
10.54	5061	5322	261
11.70	4210	4734	524
13.10	4099	4635	536
16.40	3229	3555	326
15.50	3371	3788	417
14.60	3577	3815	238
13.30	3756	3951	195
10.83	5072	5273	201
11.00	4823	5255	432

결론

표 4에서와 같이 인버터 적용시 저수로의 수위를 6.2[m]로 일정하게 유지시켜 수위를 제어하므로써 전력절감을 꾀할 수 있고 적입기동 등에 의한 Stress가 전무해지고 저 전압 및 저속 운전에 의한 Stress저하로 무고장 운전이 예상된다. 실제 서인천복합화력발전소에는 적입기동에 의한 고정자권선의 소손의 사례가 있어 이에 대한 적절한 대비책이 될 수 있다. 또한 인버터에 의한 기동으로 기존의 정지 2시간 후의 재기동 가능이라는 제한을 받지 않고 연속 운전이 가능해 향후 속도제어로 인한 전력절감외에도 운전원의 감시가 필요없는 자동 수위제어를 수행하므로써 무인운전이 가능하다. 전동기 실운전에서 입력측 정류기 2대의 병렬운전으로 인하여 단위 정류기의 전류는 30% 정도의 불평형문제가 발생하고 있는데 이를 해소해야 하는 것이 문제점으로 남아있다.

참고문헌

1. 장승식 역 “인버터 응용 매뉴얼” 도서출판 기다리
2. 생산기술개발과제 “7.2KV급 유도전동기 속도제어 시스템 개발” 보고서 전력연구원 1996. 2.

*** 전력량 계산**

표 1의 인버터 운전자료로부터 극수변환방식의 전력량을 산정함에 있어서 다음과 같은 가정이 필요하다.

1. 인버터 적용한 시스템의 전력계로부터 얻어진 자료가 정확함.
2. 펌프의 효율은 평균 70%로 가정함.
3. 전동기의 효율은 부하에 따라 90 - 94%로 함.
4. 운전자에 따라 극수변환방식에 따른 전동기 운전대수가 다를 수 있으나 여기서는 가장 over

flow가 적은 방식을 가정해서 비교함.

5. 실제는 전동기 정지 후 2시간 내 재기동 않으나 이는 무시함.

o 인버터 적용한 전동기와 16극, 18극 전동기의 양수 유량

- 인버터 적용 전동기의 양수유량은 다음식으로부터 셸

$$P = 9.8 Q H / (n_f \cdot n_m)$$

- 극수변환방식의 유량[m³/hr]은 특성곡선으로부터 셸

o 인버터 적용시스템과 극수변환모드의 운전대수 비교

해수위	가변속장치 적용 시스템	극수변환방식
11.16	I1 H2 L1	H2 L2
10.3	I1 H3	H3 L1
10.54	I1 H3	H3 L1
11.7	I1 H2 L1	H2 L2
13.1	I1 H2 L1	H2 L2
16.4	I1 H1 L2	H3
15.5	I1 H1 L2	H3
14.6	I1 H1 L2	H3
13.3	I1 H1 L2	H3
10.83	I1 H3	H3 L1
11	I1 H3	H3 L1

* H : 16극, L : 18극, I : 인버터 적용 전동기

o 부하에 따른 전동기 역률과 효율

	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
starting	0.18	0.22	0	0