

동력 절약형 교류 가변속 장치의 적용 연구

유종주*, 한병성**

(*전북대 산업대학교 석사과정

**전북대 공대 전기공학과 부교수)

1. 개요

부존자원이 빈약한 우리나라에서는 에너지 절약에 대한 노력이 절실히 요청된다고 할 수 있으며 특히 대단위 에너지가 변화되는 발전소나 산업용 보일러에서의 에너지 절감은 더욱 중요한 문제라고 볼 수 있다.

발전소와 대형보일러 시스템에는 팬과 펌프가 매우 중요한 요소로서 운전성능에 큰 영향을 미치는 동시에 에너지 소비량이 크기 때문에 효율을 개선하는 문제가 중요한 과제로 대두되고 있다. 기존의 정속운전에서는 부하가 감소할수록 효율은 매우 저하되며 이러한 손실을 줄이기 위해서 가변속 장치에 의한 에너지 절감이 모색되고 있다.

특히 대용량 프랜트의 경우 전동기가 여유율보다 과대설계되는 경우가 많기때문에 그 효과는 더욱 크다고 할 수 있다. 외국의 경우 가변속 적용이 활발하고 그 효과 및 신뢰성을 널리 인정받고 있으나 국내에서는 기술미비와 초기투자비 상승으로 널리 보급되어 있지 못하며 소형기기 정도에 적용되고 있는 단계이다[1].

가변속 장치의 적용은 에너지 절감을 목적으로 한 것이기 때문에 대상기기의 선정에 있어 가장 중요한 점은 에너지 절감 효과의 예측이다. 따라서 본 연구에서는 그 대상을 정속 펌프인 급유 펌프에 두고 그에 적용되는 실제 운용방법 그리고 적용시 문제점을 분석 하였으며, 이와함께 VVVF(Variable

Voltage Variable Frequency) 가변속 장치의 기능 및 에너지 절감에 대해 해석하였다.

2. 대상기기 특성

2.1 개요

프랜트는 수많은 보조기기로 구성되어있고, 그 보조기기의 대부분은 전동기에 의한 회전기기 즉, 펌프나 팬(Fan)으로 이루어져 있다.

동력 절약형 교류 가변속장치의 적용에 관련한 조사연구에 있어서 가변속 장치의 목적이 동력 절감이기 때문에 경제성 검토가 우선적으로 시행되어야 한다. 기기의 선정에 있어서 프랜트가 운전되는 동안 상시 부하로서 연료유를 공급하는 급유 펌프를 대상으로 하였다.

이 급유 펌프는 정속도 펌프로서 연료유의 실제 사용량에 관계없이 항상 일정한 유량을 공급하며 필요로 하는 그 이상의 양은 재순환되어 연료 저장 탱크로 회수되어 진다.

이 점을 착안하여 필요로 하는 양만큼의 연료를 전동기의 VVVF 속도제어에 의해 적정 공급하고 회수되는 연료유에 대한 전력소비를 절감하는 방안의 연구로써 3Φ 460V급 40HP의 연료유 펌프를 선정하였다.

2.2 운전 특성

프랜트가 가동되고 있는 동안은 연료유 펌프가

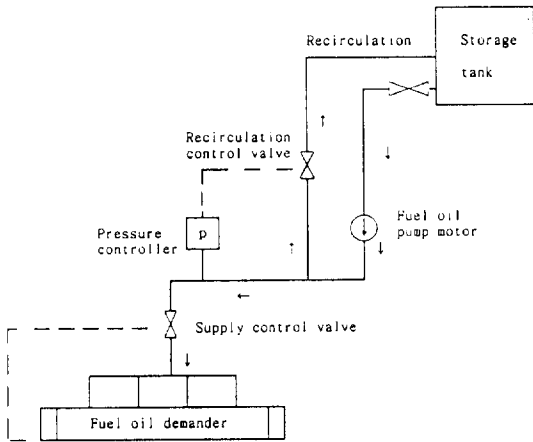


그림 1. 연료유 펌프 계통도

항상 운전되며, 이 펌프는 연료 필요량에 관계 없이 정속운전을 하게 되고 실제 연료의 조절은 Supply control valve에 의해 제어 된다. 이로 인한 배관내부의 압력변동을 조절하는 것을 Pressure controller의 설치에 의해 Recirculation control valve가 개폐되어 연료유가 재순환되어 조절되어진다. 대상기기의 계통도는 그림 1과 같다.

3. 실험 방법

기존의 정속도 전동기 회로에 그림 2와 같이 인

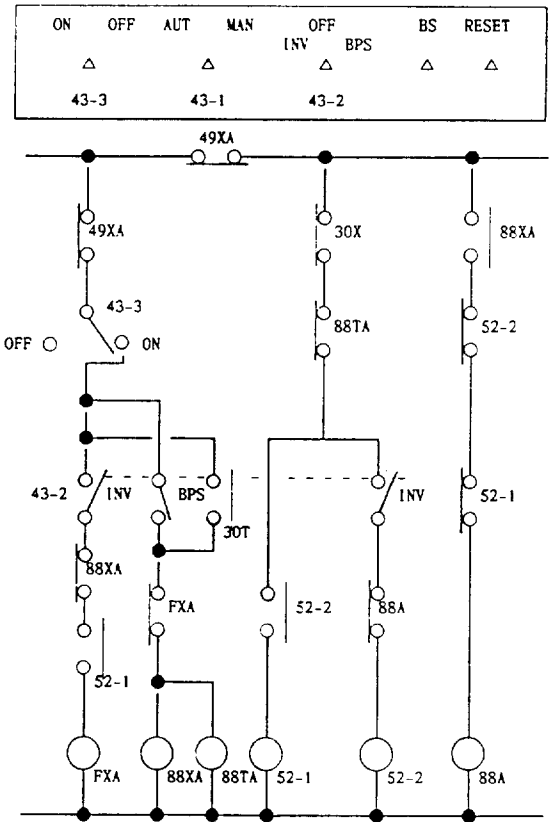


그림 3. 인버터 제어 회로도

버터 회로를 구성하여 가변속 장치를 설치한다. 그

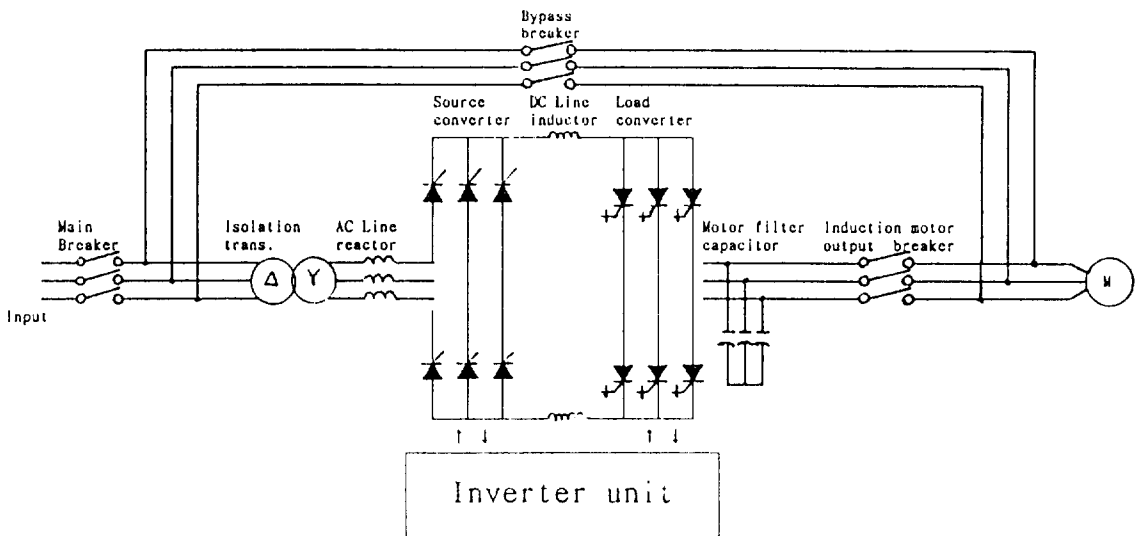


그림 2. 인버터 3상 회로도

리고 교류 가변속장치의 제어는 그림 3과 같다. 연료유 펌프 출구압력을 일정하게 설정하고 (20.0 Kg/cm²), 수시로 연료 요구량이 변화하면 출구압력이 순간적으로 변하게 된다.

연료 요구량이 증가하면 Supply control valve가 열리게 되고 출구압력이 설정 출구압력보다 낮아지게 되므로 전동기의 속도가 설정압력으로 상승시키기 위해 증가된다. 반대로 연료 요구량이 감소하면 Supply control valve가 닫히게되고 해당하는 양만큼 출구압력이 증가되어 설정압력으로 낮추기 위해 전동기의 속도가 감소된다.

교류 가변속 정상운전중 인버터 이상에 의해 인버터 유니트에 설치된 트립 릴레이(Ry.30:인버터정지)가 동작될 경우에는 정속도운전으로 자동절체(Ry.88:인버터 바이패스)되어진다. 인버터 정상 운전(VVVF 운전)과 바이패스 운전(정속도운전)은 상호 병렬운전을 피하기 위해 그림 3의 88XA 릴레이에 의해 인터록되어진다.

3.1 인버터의 자동실험 방법

인버터의 자동운전 실험이란 실제 프랜트 운전시 요구되는 연료유를 가상하여 Step상으로 연료유 펌프의 출구측 유량변화를 주었을때 각 상태변수 변화추이를 실험하는 것이다.

그림 3에서 교류가변속 장치 전원 스위치(43-3)를 ON으로 설정하고 인버터 유니트의 내부에 설치된 AUTO-MAN 선택 스위치(43-1)를 AUTO로 설정한다. INV-BPS 선택 스위치(43-2)를 INV로 설정하여 전동기가 기동되면 Supply control valve의 개도를 임의로 조작하여 펌프 출구압력을 변화시켜 실험하였다.

3.2 인버터의 수동실험 방법

인버터의 수동운전 실험이란 인버터 유니트에 설치된 출구압력 조정저항을 돌려서 각 상태변수 변화추이를 실험하는 것이다.

그림 3에서 INV-BPS 선택 스위치(43-2)를 INV로 설정하고 AUTO-MAN 선택 스위치(43-1)를 MAN로 설정한다. 전원 스위치(43-3)를 ON으로 설정하여 전동기가 기동되면 출구압력 조정저항을 임의의 값을 가변시켜 실험하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 VVVF 인버터 자동운전 실험

Supply control valve를 Step상으로 개도 변화를 주었을 때 각 변수 변화가 표 1과 같은 결과로 나타났으며 그림 4와 같은 그래프로 나타냈다.

표 1에서 1-9 Step은 유량을 조절하는 Supply control valve를 일정 개도로 서서히 열어 9 Step에서 완전히 개방하는 단계를 표시한다. 1 Step과 2 Step시 각 상태 변수가 변화하지 않고 일정값을 가지는 것은 실제 유량을 조절하는 Valve의 특성 때문이다. 즉, 5% 내외의 제어범위 여유(Margin) 설정 때문이다.[2][3]

실제 B점에서 Valve는 완전 Close되나 Close시 유체의 누설을 방지하여 신뢰도를 높이기 위하여 BC구간 만큼 더 Close신호를 주게 된다.

또한, 1-2 Step 및 7-9 Step간 주파수와 전압

표 1. 자동운전 실험 결과표

Input Step	Flow (Ton)	Frequency (Hz)	Volt (V)	Current (A)
1 STEP	0	25.0	200	14.0
2 STEP	0	25.0	200	14.0
3 STEP	5.5	30.0	240	16.7
4 STEP	11.0	39.0	310	20.2
5 STEP	14.0	45.0	360	23.0
6 STEP	18.5	51.5	420	27.8
7 STEP	22.0	57.0	460	29.9
8 STEP	26.0	57.0	460	30.1
9 STEP	28.0	57.0	460	30.2

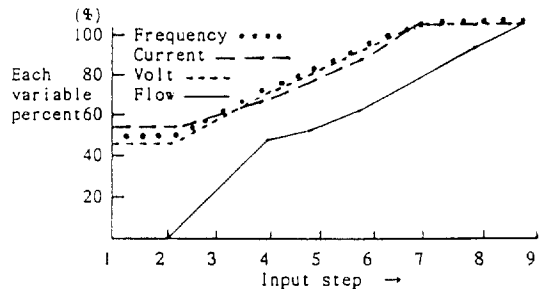


그림 4. 자동운전 시험결과 그래프

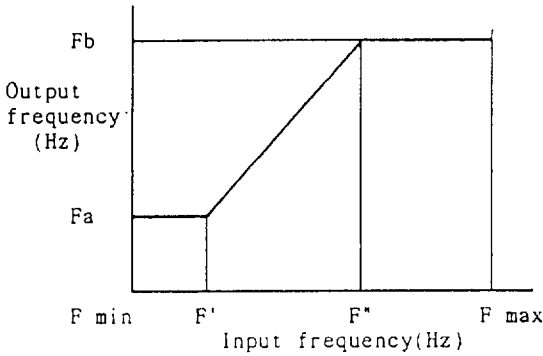


그림 5. 주파수 상/하한 설정

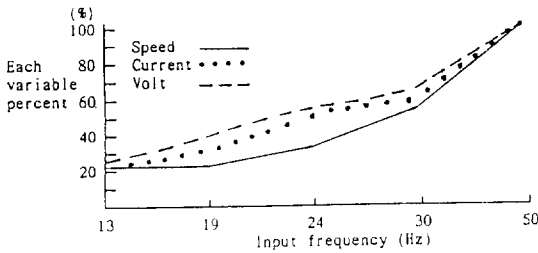


그림 6. 수동운전 시험결과 그래프

요소가 일정값을 가지는 것은 주파수의 상-하한 설정 때문이다. 이것은 전동기 보호를 위해 설정하는데 그 특성은 그림 6과 같다.

$$F \text{ min} \leq \text{입력주파수} \leq F \text{ max}$$

일 때

$$F2 \leq \text{운전주파수} \leq Fb$$

4.2 VVVF 인버터 수동운전 실험

인버터 유니트에 내장된 출구압력 조정저항을 임의로 조정하여 측정한 결과 표 2와 같은 결과로 나타났다.

표 2에서 자동운전 실험과는 달리 조정저항을 수

표 2. 수동운전 시험 결과표

Frequency(Hz)	Speed(rpm)	Current(A)	Volt(V)
13	254	6.5	100
19	267	10.0	150
24	340	14.0	180
30	562	16.0	235
50	1110	30.0	415

동으로 하향 조정하여 저주파수 영역까지 운전하여 보았으나 자동운전 실험과 크게 다른 점을 보이지 않고 주파수에 비례해서 각 변수가 변화하였다.

또한, 각 변수들의 값이 자동운전 실험과 비교하여 다소 근사치를 나타내는 것은 실험방법 차이에 따른 배관내 손실에 의한 결과로 생각된다.

4.3 전동기 온도상승 시험

보통의 전동기는 구녀선에서 발생하는 열을 회전축의 끝부분에 설치된 냉각팬(Cooling fan)에 의존하게 되므로 정격속도보다 낮은 저속도 영역에서의 장시간 운전시 권선의 과열에 의한 절연 파괴가 우려된다. 이것을 고려하여 온도 상승 시험을 실시한 결과, 정격주파수 60 Hz의 40%인 24 Hz에서의 최고온도 상승은 60℃이고, 정상 운전 중 30 Hz에서 68℃까지 상승하였으나 B종 전동기의 절연 계급 범위에서는 온도상승으로 인한 전동기의 과열은 문제가 되지 않았다.

표 3. 권선온도 상승시험 결과

운전조건	온도(℃)	대기온도(℃)
정격주파수 40%	60	20
정격주파수 50%	68	20
정속도 운전 전동기	62	20

표 4. 절연계급과 허용최고 온도(℃)

절연종류	Y종	A종	E종	B종	F종	H종	C종
허용온도	90	105	120	130	155	180	180이상

4.4 문제점 분석

연료유 공급 펌프 전동기의 축수의 유효율은 그리스 윤활 형태 축수로서 20 Hz 이하에서는 운전이 되지 않도록 저속도 한계를 설정하여 운전한 결과 실용상 문제점이 발견되지 않았다.

VVVF 시스템은 콘버터와 인버터로 구성 되는데 전력 전자 기술의 주체인 사이리스터나 전력용 트랜지스터등 전력용 반도체 소자의 스위치 작용으로 인하여 전력계통에 유입되는 고조파가 시스템에 심각한 문제를 야기시키고 있다.[4] 그러나 전력계통의 고조파는 그 자체에 고조파 발생원이 있다고는 할 수가 없고 대부분이 부하로부터 발생한 고조파

전류에 의한 것으로, 부하측의 전력 변환 장치에 그 원인이 있다고 볼 수 있다.[5]

여기서 실제 적용된 연료유펌프의 운전시험에 있어서는 고조파 영향은 실용상 문제점이 발견되지 않았고 고조파에 의한 축전압 증가나 소음의 발생, 축류서어지에 의한 절연내력 저하등은 큰 영향을 미치지 않았다.

4.5 에너지 절약효과 분석

일정기간 운전결과 에너지 절약 효과를 정확히 산출하기 위하여는 적산전력계를 설치 비교하는 방법이 가장 바람직한 방법이나 계통의 구성상 어려움이 많아 다음과 같이 산출하여 보았다.

조건과 같이 운전조건을 가정하고, 정속운전과 VVVF 운전시의 소요전력량을 비교하여 그 절감 효과를 공식으로 산출하면 다음과 같다.

조 건

- 유체 일반 공식 $P=9.8 HQ \gamma / m$ [KW]
- (수두 H [m], 유량 Q [m³/sec], 비중 γ , 효율 η)
- 전동기 전압 V (460V) ○ 전동기 전류 I (38A)
- 전동기 역률 $\cos \theta$ (0.8) ○ 일정 운전시간 h
- 일정기간 VVVF 사용기간 중 사용 유량 Q_v

정속운전시 소요전력량을 W_c [KWh]라고 하면,

$$\begin{aligned} W_c &= \text{동력} \times \text{운전시간} \\ &= \sqrt{3} VI \cos \theta \times h \times 10^3 \text{ [KWh]} \\ &= K_c \times h \text{ [KWh]} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{여기서 상수 } K_c = \sqrt{3} VI \cos \theta \times h \times 10^3 \quad (2)$$

식(2)의 상수 K_c 값은

$$K_c = \sqrt{3} \times 460 \times 38 \times 0.8 \times 10^3 \approx 24.2 \quad (3)$$

그러므로 식(1)은 다음과 같다.

$$W_c = 24.2 h \text{ [KWh]} \quad (4)$$

VVVF 운전시 소요전력량을 W_v [KWh]라고 하면

$$W_v = 9.8 \times HQ (\gamma / \eta) \times h \text{ [KWh]} \quad (5)$$

여기서 10m 水柱는 1kg/cm²이므로, 20kg/cm²의 출구 압력은 200[m] 수두에 해당 된다. 또한 중유

(B.C 유)의 비중은 0.98이고, 펌프효율은 0.95로서 (γ/η)값은 약 1 이다.

따라서 식 (5)는

$$\begin{aligned} W_v &= 9.8 \times 200 \times \frac{Q_v}{3600} \times 1 \times h \text{ [KWh]} \\ &= K_v \times Q_v \times h \text{ [KWh]} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_v &= 9.8 \times 200 \times \frac{1}{3600} \\ &\approx 5.4 \end{aligned} \quad (7)$$

그러므로 식 (6)은,

$$W_v = 0.54 Q_v \times h \text{ [KWh]} \quad (8)$$

으로 쓸 수 있다.

식 (4)와 식 (8)에서 에너지절감 전력량 P_s 는,

$$\begin{aligned} P_s &= W_c - W_v \\ &= 24.2h - 0.54Q_v \times h \text{ [KWh]} \\ &= (24.2 - 0.54Q_v) \times h \text{ [KWh]} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 VVVF 사용기간 중 유량 Q_v 가 적을수록 에너지 절감 효과는 크게 나타난다.

예를 들어, 시간당 20Ton씩 24시간 동안 VVVF 를 사용하였다면 그 절감 전력량은

$$\begin{aligned} P_s &= (24.2 - 0.54 \times 20) \times 24 \\ &= 321.6 \text{ [KWh]} \end{aligned}$$

1년 기준 300일 동안 운전을 가정하고 계산하여 보면 그 절감전력량은 96,480 [KWh]가 되고, 전력 원가 KWh당 30원(1992년도 국내 무연탄 발전소 연료비원가 평균 기준)을 감안하면 2,894,400원이 절약된다. 펌프의 구성이 수 많은 보조 전동기로 되어있는 것을 고려하면 그 적용 범위에 따라 에너지 절감효과는 더 커지게 된다.

5. 결 론

동력 절약형 교류가변속 장치 적용에 관한 조사 연구는 대용량 펌프의 부속설비에 가변속 적용시켜 에너지 절감을 도모하는 것이다.

실제 일본에서는 대용량 전력설비인 북해도 P/P, 동북 P/P, 관서 P/P 및 구주 P/P 등에서 교류가변속 장치를 적용하여 효과적인 에너지 절감을 하고 있다.[1]

본 논문에서는 교류가변속장치의 실제 적용에 관한 구체적 대상 기기를 제시하고, 실제 운전실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) VVVF 방식의 전동기 속도제어 방식은 타방식에 비해 효율이 높다.

2) VVVF 방식의 문제점으로 고려되었던 고조파 영향 및 전동기 과열등의 실용상 크게 문제 되지 않았다.

3) 에너지 절약의 확실한 동력절감 계산 효과를 얻을 수 있었다.

4) VVVF 운전시에는 정속운전과 반대로 에너지절감 효과는 저주파수 운전 영역으로 갈수록 비례하여 증가하였다.

기존 설비에 가변속 장치를 적용할 경우에는 대상 시스템과의 원활한 결합관계, 제어 시스템 설계 및 가변속 장치 운전에 발생하는 고조파 억제 대책과 저주파 운전에 따르는 문제의 해석등이 앞으로 더욱 관심 있는 분야로서 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] KEPCO. 기술연구원, "교류가변속 장치의 적용", pp.1-10, 1988.
- [2] FOXBORO Instructions, "Installation Operation Maintenance", Book No.2165, Feb., 1979.
- [3] Bailey Instruction, "Pneumatic Control

Drive", pp.81-19, Aug., 1990.

- [4] M.Inoue, "Harmonic Propagation Characteristic on Power System", Takaoka Review, Vol. 32-1, No 105. 1985.
- [5] 정연택, 이성룡, "3상 유도전동기의 속도 제어를 위한 PLL System 개선에 관한 연구", 대한 전기학회지, Vol. 30, NO.12, DEC., 1981.



유종주(柳鍾柱)

1960년 7월 25일생, 1982년 경기공업전문대학 전기과 졸업 및 한국전력공사 입사. 1986년 한국방송통신대학 행정학과 졸업. 현재 전북대산업기술대학원 석사과정,



한병성(韓秉誠)

1951년 12월 22일생, 1975년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 프랑스 루아파스퇴르 대학 박사학위 취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스 국립과학연구소) 연구원. 1989년, 현재 전북대 공대 전기공학과 부교수.