

인버터용 유도전동기의 특징

조 규진
호성 ABB

Characteristics of inverter-driven induction motor

K. J. Cho

Hyosung Asea Brown Boveri Co., Ltd.

Abstract

Nowadays inverters are widely used for energy-saving and factory automation. Accordingly the characteristics and functions of the inverter are well understood. To our surprise, the characteristics and functions of the inverter-driven induction motor are not well understood.

In this technical review, the electrical and mechanical characteristics of the inverter-driven motor, the optimal combination of the inverter with motor, the special design of the inverter-driven motor, and the application of the inverter with the existing motor are given, based on ABB Drives' experiences and technical data.

1. 서 론

농형 유도전동기는 산업체에서 가장 많이 사용되고 있으며 그 이유는 다음과 같다.

- ① 단순하고 견고한 구조이므로 가격이 저렴하고 신뢰도가 높다.
- ② 효율이 높고, 유지·보수 비용이 적으므로 운전 비용이 적다.
- ③ 가혹한 환경에 적합하다.
- ④ 국제적인 표준 설계로 호환성이 크다.

한편, 다음과 같은 이유 때문에 가변속 제어를 해야 할 필요성이 있다.^[1]

- ① 소프트 기동에 의한 기계 계통의 수명 연장, 유지 보수 비용의 절감.
- ② 정격 속도 이상의 고속 운전에 의한 생산성 증가
- ③ 정격 속도 이하의 저속 운전에 의한 전력 절감
- ④ 최적의 정밀한 속도 운전에 의한 품질 향상

유도 전동기의 속도식 $n = \frac{120f}{p} (1-S)$ 에서, 속도 제어의

3가지 요소 f (주파수), P (극수), S (슬립) 중에서 인버터에 의한 주파수 제어 방법이 가장 자주 사용되고 있다.

현재 유럽에서는 전체 유도 전동기중 약 40%가 인버터로 운전되고 있는 실정이고, 국내에서도 인버터에 의한 속도 제어의 시장이 증가하고 있다.

인버터의 설계·제작·용용 기술은 외국의 수준에 가깝지만, 인버터용 유도전동기의 기술은 크게 뒤떨어져 있음은 안타까운 일이다.

본 기술 해설에서는 ABB Drives사의 경험과 기술 자료를 근거로 하여, 인버터로 운전할 때의 농형 유도전동기의 특징, 전동기와 인버터의 최적 선정, 인버터용 전동기의 특수 설계 등에 대하여 설명하기로 한다.

2. 농형 유도 전동기의 특징

2.1 농형 유도 전동기의 등가회로

농형 유도 전동기의 간략화된 단상 등가회로는 그림 1과 같다. 단, 철손과 온도, 운전점에 따른 상수들의 변동은 무시한다.^[2]

전동기의 자속 Φ_m 는

$$\Phi_m = MI_m = \frac{E_1}{j\omega} = \frac{V_1 - I_1(r_1 + j\omega l_1)}{j\omega} \approx \frac{V_1}{\omega} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

전동기를 효과적으로 사용하려면, Φ_m 를 일정하게 유지해야 하며, 인버터에 의해 f 를 가변함으로써 전동기의 속도 제어를 하려면, f 와 비례하여 전압 E_1 을 가변해야 한다. 고정자에서의 전압 강하를 무시하면 f 와 비례하여 전압 V_1 을 가변하면 된다.

전동기의 통상적인 운전점에서는 슬립 주파수가 작으므로, 회전자 리액턴스는 무시 할 수 있으며, 전동기의 토오크 T 는

$$T = 3P \left(\frac{E_1}{\omega} \right)^2 \left(\frac{S\omega}{r_2} \right) = 3P \left(\frac{E_1}{\omega} \right)^2 \left(\frac{E_1}{r_2 S} \right) \quad (3)$$

단, P 는 상극수

식 (3)에서 E_1/ω 는 자속이고, 두번째 항은 회전자 전류 I_2 이다. 따라서, 토오크식은 직류전동기와 동일하게 식(4)가 된다.

$$T = 3P \Phi_m I_2 \propto \left(\frac{V_1}{f} \right) I_2 \quad (4)$$

전동기의 최대 토오크 T_{max} 는

$$T_{max} = 3P \left(\frac{E_1}{\omega} \right)^2 \left(\frac{1}{2I_2} \right) = \left(\frac{3P}{2I_2} \right) \Phi_m^2 \propto \left(\frac{V_1}{f} \right)^2 \quad (5)$$

식 (4), (5)로 부터, 자속이 일정하게 유지되면, f 가 변하더라도 정격토오크, 최대토오크의 크기는 일정하다는 것을 알 수 있다.

2.2 농형 유도 전동기의 특성곡선

인버터에 의해 전동기에 인가하는 전압과 주파수의 관계는 그림 2와 같다. 정격 주파수 이하에서는 전압과 주파수가 비례하며, 정격 주파수 이상에서는 전동기의 절연 문제로 인해 전압은 정격치로 일정하게 유지하고 주파수만 변화한다.

따라서, 식 (4), (5)로부터 정격주파수 이하에서는 정격 토크가 일정하게 유지되므로 일정계자 또는 정토크 영역이라고 하며, 정격주파수 이상에서는 정격토크는 f에 반비례하고, 최대토크는 f의 제곱에 반비례하므로, 약계자(field weakening) 영역 또는 정출력영역이라고 한다.

한편, 동기 이탈(pull-out)의 위험 때문에, 전동기의 통상적인 운전범위는 $0.7 \times T_{max}$ 이하로 제한된다.^[2]

따라서 그림 3에서 전동기의 연속 운전 가능 영역은

- ① 정토크 영역($f < f_N$)
- ② 정출력 영역($f_N < f < f_x$)
- ③ 일정 슬립 영역($f > f_x$)로 나누어진다.

2.3 전동기의 부하 능력

인버터로 전동기를 운전하는 경우, 전동기의 온도 상승은 높아지게 된다. 정격속도 근처에서 전동기의 냉각은 제대로 되지만, 인버터에 의한 고조파 전류에 의해서 손실이 약 1% 더 많아지므로 전동기의 온도는 지나치게 높아진다. 따라서 인버터와 전동기의 종류에 따라 전동기의 부하를 5~15% 저감하여 사용하여야 한다.

정격 속도 이하에서는 자냉식 전동기인 경우, 냉각 효과가 속도에 비례하여 저하되므로, 전동기의 온도는 더 높아질 수 있게 된다. 따라서 전동기의 부하를 속도에 비례하여 대폭 저감시켜야 한다. 강제 냉각 전동기인 경우에는 냉각효과가 별로 저하되지 않으므로, 그림 4와 같이 부하를 조금만 저감시켜도 된다.^{[3], [4]}

이와 같은 전동기의 부하 저감은 팬·펌프와 같은 자승 저감 토크 부하의 경우에는 문제가 되지 않지만, 정토크 부하인 경우에는 매우 중요하게 고려해야 한다.

2.4 인버터와 전동기의 최적 선정

부하를 원하는 속도범위에서 운전할 수 있는 가장 경제적인 구동 장치를 선정하려면 감속기 + 전동기 + 인버터 전체를 고려해야 하지만, 여기에서는 전동기 + 인버터에 대해서만 생각한다.

예를 들면, 정토크 부하(500Nm)를 700~1600 rpm에서 운전하고자 할때, 그림 4의 전동기의 부하 능력을 고려하여 극수와 냉각 방식에 따라서 그림 5와 같은 3가지의 선정을 할 수 있으며, 이 중에서 가장 경제적인 것은 90Kw 6P 전동기 + 125KVA 인버터임을 알 수 있다.^[3]

일반적으로 정토크 부하인 경우, 전동기의 약계자 영역을 활용하면 경제적인 선정이 된다.

철강·제지에서 사용되는 권어기(umwinder)와 같은 정출력 부하의 경우에는 약계자점 주파수를 25Hz로 설계하고, 약계자 영역에서 광범위한 가변속 운전(예, 1:3)을 함으로써 전동기와 인버터의 용량을 대폭 감소시킬 수 있다.

즉, 주로 전동기의 극수, 냉각 방식, 정격 주파수의 선택에 의하여 가장 경제적인 선정을 할 수 있게 된다.

2.5 인버터용 전동기

인버터로 전동기를 구동할 때, 상용전원 운전과 다른 점은

- ① 가변주파수
- ② 합성된 파형
- ③ 가변속에 대한 부하의 특성의 3가지이며, 이에 따른 전동기영역의 영향은 표 1과 같다.^[5]

현재 국내의 경우, 인버터용 전동기로서 특별히 고려하는 사항은 다음과 같다.

- ① 정토크 부하인 경우, 냉각효과를 높이기 위해 2~3 프레임 큰 전동기 사용
- ② 절연 계급을 F종으로 높인다.
- ③ 고속 운전시 베어링을 제 선정
- ④ 권선, 베어링에 온도 센서 사용
- ⑤ 중·대형 전동기인 경우 반부하속에 절연 베어링 사용
- ⑥ 필요시 속도 검출 장치 부착

그러나, 큰 전동기를 사용하게 됨으로써, 기술적(중량, 면적), 경제적(전동기 + 인버터의 구입가격)으로 불리하게 되어 경쟁력이 떨어지는 경우가 있다.

한편, ABB Drives사의 경우에는 인버터용 전동기에 대하여 다음과 같은 많은 기술적 사항들을 고려하고 있다. 특히 경제성을 고려하여 200Kw 이하에서는 표준 전동기를 보완하여 사용하지만 200Kw 이상에서는 되도록 특수 설계를 적용하고 있다.

- (1) 전 속도 범위에서의 온도 상승
- (2) 속도의 함수로 변화하는 소음 레벨
- (3) 효율을 보증해야 하는 경우, 손실의 특성
- (4) 특수한 응용에서의 비틀림(torsional) 진동, 고조파 진동(비틀림 해석이 필요할 수도 있다.)
- (5) 제급유 주기(베어링의 온도 15° C 상승시 마다 급유 주기를 1/2로 단축 하거나 고온용 윤활유 사용)
- (6) 자체순환식 슬리브(sleeve) 베어링인 경우, 최저 속도(강제 순환식 베어링이 필요할 수도 있다.)
- (7) 베어링의 수명과 절연(반부하속 베어링)
- (8) 공진(critical) 속도 : 벤딩(bending) 모드
- (9) 최고 속도시 축 부착 팬(fan)의 기계적 강도
- (10) 약계자점의 주파수 선택
- (11) 전동기-인버터의 최적 결합
- (12) 전동기와 인버터 사이의 케이블 설치와 접지
- (13) 전동기의 냉각 방법 선택
- (14) 속도 측정/조정/제어 방법
- (15) 단시간 과부하 내량
- (16) 케이블의 거리와 전동기의 절연 보장
- (17) 기존 전동기 또는 타업체의 전동기 사용시, 전동기의 포피 효과 계수
- (18) 전류의 피크치와 충분한 과부하 토크 내량을 고려한 전동기의 최대 토크

ABB Drives가 설계한 동일한 프레임(IEC 400L)에서의 380V, 50Hz, 4P 전동기의 데이터는 표 2와 같다. 속도 토크 특성은 그림 6과 같다.^[6]

인버터용 전동기의 경우, 고조파 손실때문에 효율이 낮고 따라서 출력이 저감된다. T_{max}/T_N , I_0/I_N 값이 작다는 것은 전동기의 내부 리액턴스가 크다는 것을 의미한다.

인버터로 기동시에는 T_{max} 의 오른쪽 운전영역을 이용하여 소프트 기동을 하게 되므로, 상용전원용 운전시와 달리 기동 토크 T_0 는 작아도 된다.

2.6 인버터 종류와 전동기

인버터를 전압형(PWM 포함)과 전류형으로 나눌 수 있다. 표 3과 같이 전압형의 경우, 전류의 피크치를 줄이기 위해 전동기의 리액턴스를 크게하는 것이 좋으며, 전류형의 경우에는 전압의 피크치를 줄이기 위해 전동기의 리액턴스를 작게하는 것이 좋다. 전동기의 리액턴스 값에 따라서 토크 곡선도 달라지게 된다.

그 이외에도, 표 4와 같이 최대토크, 자속, 도체 단면적, 슬롯의 형상, 약계자점 등에서 전압형과 전류형에 따라 설계 내용이 달라진다.^[6]

2.7 기존 전동기에의 인버터 적용
인버터용으로 제작되지 않은 기존 전동기에 인버터를 적용할 때에 고려할 사항은 다음과 같다.

- ① 속도 범위와 부하의 특성
- ② 인제의 부하율과 온도 상승에 대한 여유
- ③ 심구(deep) 슬롯, 2중 슬롯등인 경우, 고조파에 의한 부분적 온도 상승
- ④ 부하와 전동기의 비틀림(torsional) 해석
- ⑤ 저속시의 베어링 윤활 작용
- ⑥ 축전압에 의한 베어링 파손(접지 브러시 사용)
- ⑦ 전압 서어지에 의한 전동기의 절연 스트레스 (인버터와 전동기 사이에 필터 사용)

3. 결 론

인버터용 전동기의 특성과 설계시 고려 사항에 대하여 설명하였다.

인버터 전용 전동기의 사용에 의해 사용 재료의 절삭, 설치 공간의 감소, 소음 감소, 효율 향상, 수명 연장등 많은 장점을 얻을 수 있게 된다.

표 1. 인버터가 전동기에 미치는 영향

| 가변 주파수 | 합성 파형 | 피구동 부하의 특성 |
|--|---|---|
| 속도 범위 베어링 수명 제급유 주기 공진(critical)속도 중손 철손 진동 속도에 의한 소음 | 손실 증가 백동 모오크 전압 피이크 축 전압 의압-접지 전위 고조파 소음 진동 | 속도-모오크 특성 속도-부하 운전시간 운전(duty) 주기 부하에 의한 모오크 역률 정상상태(static) 정밀도 과도상태(dynamic) 정밀도 전동기 영역 전동기+제동 영역 전동기+발전기 영역 |

표 3. 인버터 종류에 따른 특성

| 비 고 | 전압형 인버터 구성 | 전류형 인버터 구성 |
|----------|------------|------------|
| 제어 파형 | 전압 | 전류 |
| 결과 파형 | 전류 | 전압 |
| 전동기 등가회로 | 큰 리액턴스 | 작은 리액턴스 |
| 모오크 특성 | | |

따라서, 국내의 전동기 업계에서도 인버터 수요의 증가에 발 맞추어 인버터 전용 전동기의 개발을 위해 시험 기술, 설계 기술, 규형 등에 대한 투자를 해야할 시기라고 본다.

참 고 문 헌

- [1] ABB Drives, "In All These Applications, Variable Speed Drives Give Better Performance for Your Money", 4890069-922, pp 2-3, 1989.
- [2] ABB Strömberg Drives, "Speed Control of Squirrel-Cage Motors with PWM Frequency Converter", EN 5350610-1A, pp 3-6, 1989.
- [3] ABB Strömberg Drives, "Dimensioning of the SAMI STAR Frequency Converter and the Motor", SAMI STAR Product Manual EN 5352574-1A, pp 9-40, 1987.
- [4] ABB Strömberg Drives, "Frequency Converter Fed Induction Machines", Product Information File 3310, pp 1-3, 1988.
- [5] ABB Strömberg Drives Machines, "Frequency Converter Fed Induction Machines", Product Information File 3311, pp 1-13, 1989.
- [6] ABB Strömberg Drives, "HXUR Motors for SAMI Supplied Pump & Fan Drives", Product Information File 2212, pp 3-4, 1988.

표 2. ABB Drives의 전동기 데이터

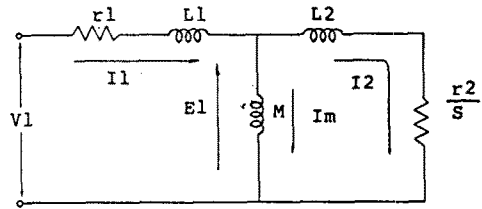
| 종 류 | 출력(Kw) | T _{max} /T _N | 효율(%) | I _s /I _N |
|--------|--------|----------------------------------|-------|--------------------------------|
| 상용 전원용 | 500 | 2.3 | 96.4 | 6.2 |
| 인버터용 | 430 | 2.1 | 95.7 | 5.1 |

표 4. 인버터 종류별 전동기의 설계시 고려사항

| 특성 | 전압형 인버터 구성 | 전류형 인버터 구성 |
|-------------|------------|-----------------|
| 최대 모오크 | 작다 | 크다 |
| 고정자권선의 포비효과 | 작다 | 작다 (과용) |
| 고정자권선의 리액턴스 | 크다 | 작다 |
| 회전자권선의 포비효과 | 작다 | 작다 |
| 공극거리 | 크다 | (과용) |
| 주자속 | 작다 (자속 감소) | 크다 (자속증가 또는 일정) |
| 도체 단면적 | 넓다 (슬롯 확장) | 좁다 (슬롯 감소) |
| 계열, leath | 좁다 | 넓다 |

(표 4. 계속)

| 결연 단계 | 결연 필립 추가 560V급(당상) 500V급(거리 150m 이상) 440V급(거리 220m 이상) 3.3KV급(6KV급 결연 시스템 사용) | 결연 필립 추가 560V급(당상) 500V급(당상) 500V급(당상) |
|-----------------------------|---|---|
| 약계자점(Field Weakening Point) | 넓은 범위에서 조정 가능 | 거의 일정 |
| 바이 페이스 | 약계자점을 전진 주파수와 같게 한다. | (좌동) |
| 강제 냉각 | 정보오크 부하이여, 광범위한 속도제어일때 사용 | (좌동) |
| 속도검출장치 (TG, PG) | 속도 제어시, 배터 제어시 | (좌동) |
| PTC 대신 PL-100 사용 | 온도의 연속적인 측정이 요구될 때 | (좌동) |
| 결연 배어링 | 상용 전원 사용시보다 축전압이 높아질 수 있다. | (좌동) |



V_1 : 고정자 상전압 r_1 : 고정자 저항
 E_1 : 유기 전압 L_1 : 고정자 누설 인덕턴스
 I_1 : 고정자 전류 r_2 : 회전자 저항
 I_2 : 회전자 전류 L_2 : 회전자 누설 인덕턴스
 I_M : 여자 전류 M : 여자 인덕턴스

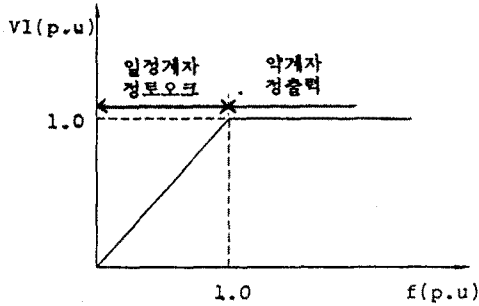


그림 2. 전압-주파수 곡선

그림 1. 능형 유도전동기의 등가회로

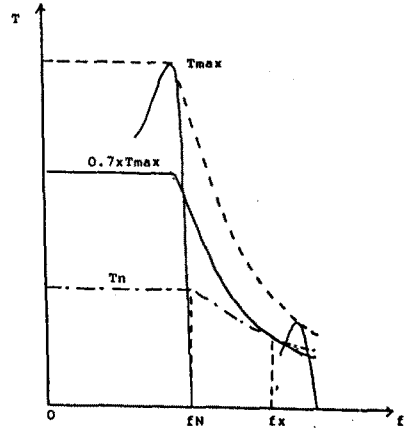


그림 3. 연속 운전가능 토오크 영역

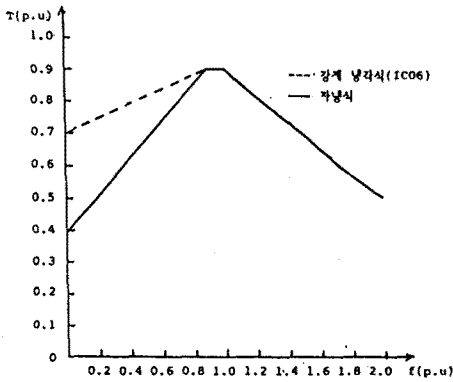


그림 4. 인버터 구동 유도전동기의 부하 능력 곡선

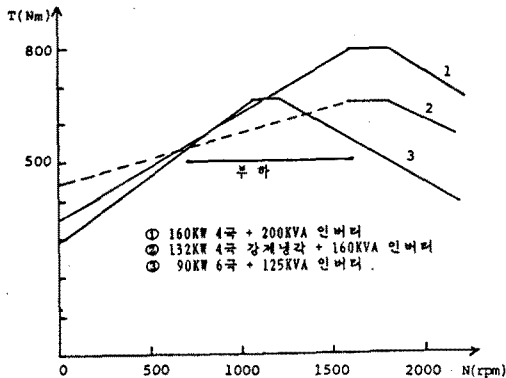


그림 5. 전동기 + 인버터의 선정곡선

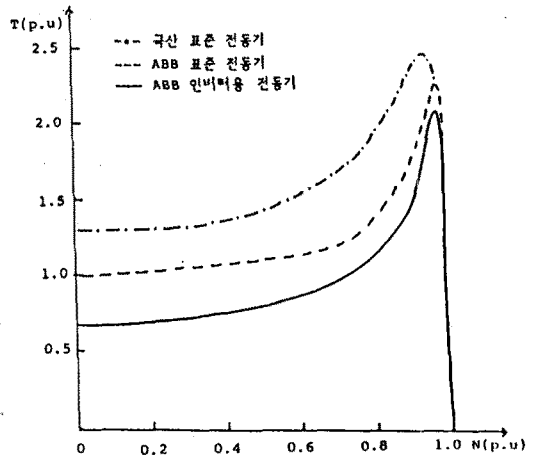


그림 6. 속도-토오크 곡선