

# INVERTER를 응용한 MOTOR 냉각 제어시스템의 전력절감에 관한 연구

## A Study on Energy Saving of the Motor Cooling System with an Inverter

김기홍\*, 정지훈\*\*, 권봉환\*\*\*

Ki-Hong Kim, Jee-Hoon Jung, Bong-Hwan Kwon

**Abstract** - This paper is concerned with the simulation and determination of the input voltage and frequency for the optimal efficiency operation of induction motors. In general, induction motors have a specific character that operation efficiency is dropped sharply at the light loads condition. Consequently, if the induction motor is controlled by high efficiency using the VVVF(variable voltage variable frequency) control methods at optimal values, the entire system can obtain the substantial energy savings from the efficiency improvement in induction motors. In this paper, optimal slip is derived from the modeling of an induction motor and the optimal hybrid-control method is suggested by the simulation of the proposed algorithm for a 3-phase induction motor.

**Key Words** : efficiency : induction motor : VVVF : inverter : energy saving

### 1. 서 론

최근 국제 에너지 정세의 불안정으로 인하여 에너지를 절감하기 위한 전력 장치의 효율 증대 기술에 대한 요구가 높아졌다. 특히 산업 현장에서 폭 넓게 사용되는 유도 전동기의 고효율 운전 방식에 대한 개발은 에너지 절감 효과를 크게 볼 수 있다. 동력의 70% 이상을 차지하는 팬, 펌프, 송풍기 부하 등의 가장 큰 특징은 회전수가 낮아지면 부하를 구동시키기 위한 토크도 작아지는 부하로서 부하의 토크 특성이 회전수의 2승에 비례하고 동력은 회전수의 3승에 비례하는 특성을 가진다. 그림 1 은 냉각팬 모터를 정격속도, 상용주파수로 운전하고 계절에 따라 댐퍼를 조정하여 일정 풍량을 발생 시켜 냉각 시키는 댐퍼 냉각 제어방식에 VVVF inverter를 설치하여 냉각팬 모터(induction motor)의 회전속도를 자유자재로 제어함으로써 에너지 절감을 달성하기 위한 대표적인 모터 냉각 제어 장치이다. energy saving server 에서는 모터에 설치된 센서로부터 각 data를 상시 monitoring 하여 부하전류, 모터로 유입되는 입출력 air 온도, stator 및 field coil온도 등을 수집함으로써 모터를 냉각하기 위한 최적 공급 air량을 결정하며 계산된 air량에 따라 냉각팬 모터(cooling fan motor)의 speed를 결정하여 VVVF inverter의 speed로 전송한다. 유도전동기는 비교적 효율이 높은 에너지 변환 장치이지만 슬립이 작은 저속 구간이나 경부하 조건에서 운전 효율이 급격하게 떨어지는 특성을 보인다. 따라서 인버터를 통해 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)

제어기법으로 유도전동기가 최고의 효율로 운전될 수 있는 최적의 슬립으로 전동기를 제어한다면, 유도전동기 시스템의 전력 절감을 달성할 수 있다. 본 논문에서는 유도전동기의 모델링을 통해 최적 슬립을 유도하고, 3상 2 HP 220V 유도 전동기에 대하여 Simulation을 통하여 제안된 제어 방식을 검증한다.

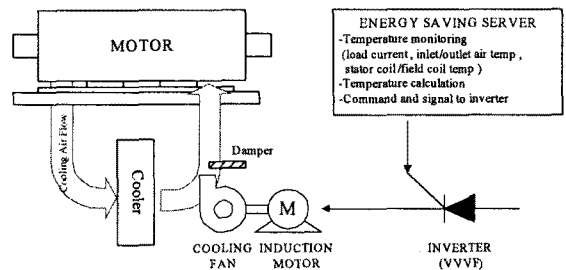


그림 1 모터 냉각 제어시스템 구성도

### 2. 본 론

#### 2.1 Optimal VVCF 제어방식을 이용한 효율향상

그림 2 는 삼상 유도전동기의 상당 등가회로(a)에 대한 상당 근사 등가 회로(b) 이다. 이 회로를 이용하여 유도전동기를 정상상태에서 해석 및 효율 향상 이론에 대해 설명하면 다음과 같다.

##### 2.1.1 유도전동기의 최대효율

$$\eta = \frac{R_r/s - R_r}{G_m [(R_s + R_r/s)^2 + X^2] + R_s + R_r/s} \quad (1)$$

저자 소개

- \* 浦項工科大学校 鐵鋼學科 碩士課程
- \*\* 浦項工科大学校 電子電氣工學科 博士課程
- \*\*\*浦項工科大学校 電子電氣工學科 教授 · 工博

윗 식에서 알 수 있듯이 효율은 인가전압에 무관하며 슬립  $s$  즉, 회전속도에만 관계 된다. 여기서

$$R_0 + R_r/s = R_0 + R_r + (1-s)R_r/s \quad (2)$$

이므로  $R_0$  를  $R_0 = R_0 + R_r$ ,  $R_0$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$R_0 = \left(\frac{1-s}{s}\right)R_r \quad (3)$$

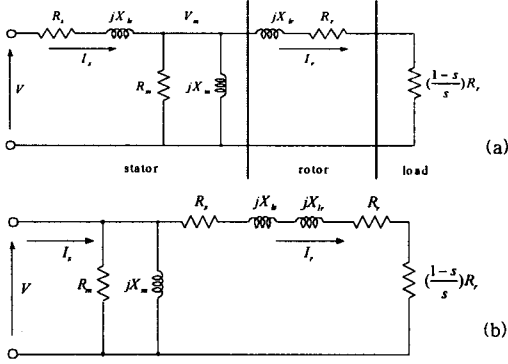


그림 2 유도전동기의 등가회로

식 (3)을 이용하면 효율은  $R_0$  의 함수가 된다.

$$\eta = \frac{R_0}{G_m \left\{ (R_t + R_0)^2 + X^2 \right\} + R_t + R_0} \quad (4)$$

최대효율은 구하기 위하여

$$\frac{d\eta}{dR_0} \quad (5)$$

의 근을 구하면 다음과 같다.

$$R_0 = \sqrt{R_t^2 + X^2 + R_t R_m} \quad (6)$$

따라서, 최대효율 일때의 슬립  $s_\eta$  는

$$s_\eta = \frac{R_r}{R_r + R_0} = \frac{R_r}{R_r + \sqrt{R_t^2 + X^2 + R_t R_m}} \quad (7)$$

이며 이  $s_\eta$  를 식 (1)에 대입하면 전동기의  $\eta_{max}$  는 다음과 같이 된다.

$$\eta_{max} = \frac{R_m}{2R_t + R_m + 2\sqrt{R_t^2 + X^2 + R_t R_m}} \quad (8)$$

이상에서 알 수 있듯이 최대효율은 전동기가 설계되면 고정된 값이 되며 슬립  $s_\eta$ 로 유지한다는 것은 최대효율로 운전됨을 의미한다.

### 2.1.2 최적효율로 운전하기 위한 인가전압

$s_\eta$ 는 최대효율 때의 슬립을 나타내는데 이때의 토크를  $T_\eta$ 라 하자. 최적 효율제어는 슬립을 최대효율이 나타나는 슬립  $s_\eta$ 로 제어하게 되므로 슬립을  $s_\eta$ 로 고정시키면 전압은 토크의 자속군에 비례한다. 이것은 부하량이 감소하여 부하가 요구하는 토크가 감소 하였을 때 전압을 토크의 자속군에 비례하여 감소 시켜 주어야 함을 의미한다.

$$V = \left\{ \frac{2w_s}{3p} \cdot \frac{(R_0 + R_r/s)^2 + (X_{ls} + X_{lr})^2}{R_r/s} \right\}^{1/2} \cdot \sqrt{T} \quad (9)$$

## 2.2 Optimal VVVF 제어방식을 이용한 효율향상

그림 3은 그림 2 (a)의 Thevenin 등가 회로이다. 이 회로를 이용하여 유도전동기를 해석하면 다음과 같다.

전동기의 입력 전력(Input Power)  $P_m$  은 그림 1(a)와 그림 3으로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$P_m = 3VI\cos\theta = \frac{3V^2(R_r/s + R_{th})}{(R_r/s + R_{th})^2 + X_{th}^2} \quad (10)$$

여기서 각  $\theta$  는 전동기의 등가 임피던스의 위상각이다.

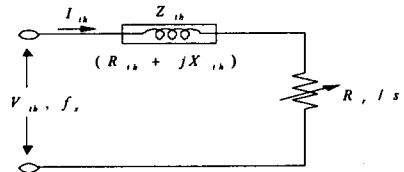


그림 3 유도전동기의 Thevenin 등가 회로

$P_{out}$ 은 다음과 같다.

$$P_{out} = 3I^2 R_r/s = \frac{3V^2 \cdot R_r/s}{(R_r/s + R_{th})^2 + X_{th}^2} \quad (11)$$

따라서 식 (11)을 풀면 다음과 같이 계산이 가능하다.

$$T_e = \frac{3p \cdot V^2 \cdot R_r/s}{2w_s(1-s) \left\{ (R_r/s + R_{th})^2 + X_{th}^2 \right\}} \quad (12)$$

여기서  $p$ 는 전동기의 극수이다. 또한, 식(1) 으로부터 전동기의 효율  $\eta$  을 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{R_r/s - R_r}{G_m \left\{ (R_{th} + R_r/s)^2 \right\} + R_{th} + R_r/s} \quad (13)$$

식 (10)과 식 (12)을 통해 효율에 대한 최적의 조건을 구하기 위해 적당한 Functional을 최소화 하는 방법을 이용하고자 한다. Lagrange Multiplier  $\lambda$  를 설정하고,  $\lambda$  를 이용하여 Augmented Functional  $L$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$L \triangleq P_m + \lambda(T_e - T_l) \quad (14)$$

식 (14)를 풀어서 정리하면 다음과 같은 이차 방정식을 얻을 수 있다.

$$s^2 - \frac{R_{th} - R_r}{R_{th}}s - \left[ 1 + \frac{\lambda}{w_s} \right] \frac{R_r}{R_{th}} = 0 \quad (15)$$

입력 각주파수  $w_s$  가 충분히 크다고 가정하여 식 (15)를 풀면 최적 슬립(slip)에 대한 다음의 두 값을 얻을 수 있다.

$$s = 0, 1 - \frac{R_r}{R_{th}} \quad (16)$$

여기서 슬립이 영 일 때는 회전자 기계적 회전이 일어나지 않아 의미가 없다. 따라서 최적 효율을 위한 최적 슬립은 다음과 같다.

$$s = 1 - \frac{R_r}{R_{th}} \quad (17)$$

따라서, 식(17)을 통해 입력각주파수  $w_s$ 는 다음과 같다.

$$w_s = \frac{R_{th}}{R_r} w_r \quad (18)$$

식 (14)를 Lagrange Multiplier  $\lambda$  에 대해 최적화 과정을 거치면 전동기 입력 전압  $V$  에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2T_L \omega_s \{ (R_r/s + R_{th})^2 + X_h^2 \}}{3p(R_r/s + R_{th})}} \quad (19)$$

결과적으로 optimal VVVF를 이용한 전동기의 최적 효율 제어는 최적 슬립  $s_{op}$ , 최적 입력 주파수  $f_{s,op}$ , 그리고 최적 입력 전압  $V_{s,op}$  를 만족시킬 때 최대 효율  $\eta_{max}$  로 운전이 가능하다.

### 2.3 Hybrid 방식의 최적 효율제어 방안

그림 4는 아래 모터 데이터를 이용하여  $v/f$  를 일정하게 제어하던 기존의 conventional VVVF 제어, 주파수 일정제어 방식인 optimal VVCF 제어, 그리고 V/F비 가변 제어방식인 optimal VVVF 제어 방식의 효율(eficiency)과 슬립(slip), 최적 전압(voltage)에 대해 이전 장에서 유도한 수식을 MATLAB을 이용하여 simulation 수행한 결과이다.

□  $V:220V, f_s:60Hz, f_{s1}:2Hz, p:2, R_r:0.05\Omega, X_s:0.1045\Omega, R_{th}:0.042\Omega, X_h:0.1045\Omega, R_m:25.67\Omega, X_m:1.365\Omega$

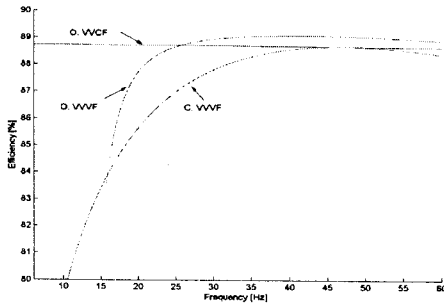


그림 4 주파수 대비 효율 곡선

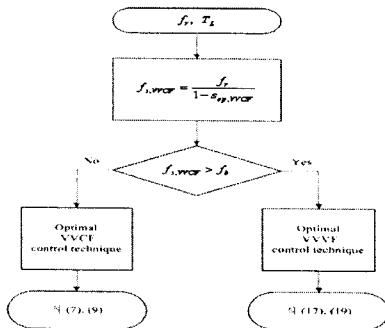


그림 5 Hybrid 방식의 최적제어 알고리즘 흐름도

그림 4의 결과를 통해 저속 영역에서는 optimal VVCF 최적 제어 방식을 선택하고 고속 영역에서는 optimal VVVF 최적 제어 방식을 선택하는 것이 효율 향상에 유리함을 확인하였다. 식 (1) 과 식 (13) 을 통해서 optimal VVCF 최적 제어와 optimal VVVF 최적 제어 시 효율이 동일해지는 경계 주파수를  $f_b$ 라 하면  $f_b$ 는 다음의 식을 만족시킨다.

$$R_{th} \Big|_{f_b = \beta} = R_s \quad (20)$$

따라서, 그림 5와 같이 전동기를 제어할 때 경계 주파수  $f_b$ 보다 낮은 영역에서 운전 시에는 optimal VVCF 최적 제어

방식을 사용하고,  $f_b$ 보다 높은 영역에서 운전 시에는 optimal VVVF 최적 제어 방식을 사용하는 Hybrid 방식의 운전을 통해 항상 전동기의 최대 효율을 이끌어 낼 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문을 통해 inverter를 응용한 motor냉각 제어시스템의 전력질감을 위해 유도 전동기를 최적 효율로 운전하는 제어 방식을 제안하였다. 그림 5와 같이 제안된 Hybrid 방식의 최적 제어 알고리즘은 optimal VVCF 제어 방식과 optimal VVVF 제어 방식의 절충 형태로 두 제어 방식의 장점으로 가지는 운전 영역에서 우수한 제어 방식을 채용한다. optimal VVCF의 경우 25Hz 이하 저속 영역에서는 최적 슬립이 주파수에 거의 영향을 받지 않으므로  $v/f$  를 일정하게 제어하는 기존의 conventional VVVF 제어 방식에 비해 최대 15% 이상의 효율을 증가시킬 수 있다. 그러나 전동기 모델의 오차로 인하여 25Hz 이상의 고속 영역에서는 효율이 optimal VVVF제어의 효율에 비하여 약 1% 정도 감소하는 경향을 보이고 있다. optimal VVVF 제어 방식의 경우 전동기 모델의 오차가 거의 없기 때문에 고속 영역에서는 최고의 효율로 운전이 가능하다. 그러나 저속 영역에서는 유도된 최적 슬립이 급격하게 변하고, 최적 슬립의 유도 과정에서 근사화가 들어갔기 때문에 좋은 운전 특성을 보여주지 못한다. 따라서 유도된 두 제어 방식의 슬립이 같아지는 주파수를 기준으로 저속은 optimal VVCF, 고속은 optimal VVVF 방식으로 사용하여 전 구간에서 유도 전동기를 최적의 효율로 사용하고자 한다.

### 참 고 문 헌

- [1] SEN CHEN and SHENG-NIAN YEN, "Optimal Efficiency Analysis of Induction Motors Fed by Variable-Voltage and Variable-Frequency Source", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.7, No.3, pp. 537-543, Sep. 1992.
- [2] N. Mohan., "Improvement in Efficiency of Induction Motors by means of Voltage Control", IEEE Trans. Power Appr. Syst Vol. PAS-99, No.4, July/Aug. 1980.
- [3] Bimal. K. Bose., "Adjustable Speed AC Drives-A Technology Status Review", Proceeding of the IEEE, Vol. 70. No. 2. pp. 116-135. Feb. 1982.
- [4] M.H Park and S.K Sul, " Microprocessor-Based Optimal-Efficiency Drives of an Induction Motor", IEEE Trans. IND. ELECT Vol. IE-31. No. 1, pp. 69-73, Feb. 1984.
- [5] A Bellini R. Miglio.V, Reggiani and C Tassoni "Voltage-Frequency Law in Frequency-Controlled Induction Motor Drives" in Conf. Rec. Rec. 13th Annu. Meet. IEEE Ind. Appl Sdc pp690-693. 1978.
- [6] 박민호, 칠승기, VV-VF 제어에 의한 3상 유도전동기의 고효율화 운전에 관한 연구", 전기학회지, 제30권, 제7호, pp. 64-69, 1981. 7.
- [7] 김태승, "유도전동기 최적효율 운전을 위한 교류 전압 제어 장치의 개발", 상공자원부, pp.10-25. 1994. 11.
- [8] 松野範衝, "インバ[タ]ドライブ 技術", (株)安川電機, 日刊工業, pp. 1-46