

〈論 文〉

# 축전기형 전동기의 토크에 대한 특성분석 및 그 변동성분의 감소를 위한 연구

고홍석\* · 신성수\* · 김광준\*\*

(1993년 6월 2일 접수)

## Identification of Torque Characteristics in Capacitor Type Electric Motors and Reduction of Its Fluctuation Components

Hong-Seok Ko, Sung-Soo Shin and Kwang-Joon Kim

**Key Words :** Capacitor Type Motors(축전기형 전동기), Fluctuating Torque(토크의 변동성분), Two Revolving Field Theory(2회전 자계이론), Stationary Reference Frame Theory(고정 기준좌표계 이론), Taguchi Method(다구찌방법)

### Abstract

The purpose of this study is to identify torque characteristics in capacitor type electric motors and to illustrate the effects of several design parameters on the fluctuating components of the motor torque. To do this, two revolving field theory and stationary reference frame theory were applied to derive governing equations for the torque generated by motor. For simulation studies, parameters of the motor components were measured under the conditions of no loading and locking. Based on these, effects of several design variables on the torque characteristics were analyzed and compared with the actual measurements, which were estimated indirectly by measuring the stator voltage and current. Then, some illustrative improvements in design are suggested by taking Taguchi method.

### 기 호 설 명

$C$ : 축전기 용량	$V$ : 전압
$i$ : 전류	$x_m$ : 여자(magnetizing) 리액턴스
$N$ : 권선비	$x_c$ : 축전기 리액턴스
$p$ : $d/dt$	$\omega_b$ : 전원주파수
$P$ : 극(pole)수	$\omega_r$ : 회전속도
$r_m, x_m$ : 주코일의 저항 및 리액턴스	$\omega_s$ : 동기회전속도
$r_a, x_a$ : 부코일의 저항 및 리액턴스	$\lambda$ : 자기플럭스 세기
$r_r, x_r$ : 회전자의 저항 및 리액턴스	
$s$ : 슬립	
$T$ : 토크	

## 1. 서 론

일반적으로 구조물에 동적인 힘이 가해지면 진동과 함께 소음이 발생하게 된다. 이러한 진동, 소음

\*한국과학기술원 기계공학과  
\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

문제를 해결하기 위한 대책의 첫번째 절차는 구조물에 전달되는 동적인 힘의 특성을 파악하고 이에 대한 원인을 규명하는 것이다. 축전기형 단상 유도전동기가 장착된 가전제품(예: 세탁기)들의 운전시, 발생하는 음압을 측정하여 분석하면, 흔히 120 Hz와 이의 정수배 성분들이 나타나는데, 이것은 전동기의 토크가 정적성분외에 회전수에 관계없이 120 Hz와 이의 정수배성분들을 포함하고 있기 때문이다.<sup>(1)</sup> 본 논문에서는 이러한 변동성분 발생의 원인규명을 위하여 전동기의 토크 특성에 관한 이론식을 검토하고, 유도된 식으로부터 토크의 정성적, 정량적 성질을 파악한 후, 변동성분을 줄이는 한 방법을 제시하고자 한다.

단상 유도전동기는 그 운전 특성이 다상 유도전동기보다 좋지 않지만, 다상교류 전원공급이 쉽지 않은 일반 가정용 제품에는 널리 사용되고 있다. 축전기형 단상 유도전동기는 시동토크를 발생시키기 위하여 시동시에만 축전기를 사용하는 경우와 시동시뿐만 아니라 정상 운전시에도 축전기를 사용하는 경우로 구분할 수 있다. 어느 경우이건 축전기의 기능은 부코일전압을 주코일전압보다 위상이 90° 앞서게 함으로써 2상 전동기와 같은 효과를 내는 것이다. 본 논문에서는 후자의 경우를 다루었다.

주코일과 부코일에 크기가 같고 위상차가 정확히 90°인 2상 전원이 공급되면, 정상상태에 도달한 후에는 토크가 정적인 성분만으로 일정하게 유지된다. 그러나 단상 전원으로부터 축전기를 사용하여 2상 전원을 공급받는 축전기형 전동기에서는 주코일과 부코일에 정확히 서로 같은 크기 및 90°위상차의 전압을 공급하는데 한계를 가지고 있다. 이런 경우 토크에서 어느 정도의 변동성분 발생은 필연적이 되어, 1차적으로 전동기 자체의 진동, 소음, 회전이상 등을 일으키고, 접속구조물에 가진력으로 작용하므로써 2차적인 진동, 소음을 유발하게 된다.

축전기형 전동기에 대하여 여러가지 이론식이 유도되어 있는데, 본 연구에서는 2회전 자계(two revolving field)이론과 고정 기준좌표계(stationary reference frame)이론을 이용하여 토크 산출식을 유도하고 그 특징을 비교하였다. 또한 고정자의 전압 및 전류를 측정후, 이 측정치를 고정 기준좌표계 이론에 적용함으로써 변동 토크 성분을 간접적으로 확인하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 전

동기의 설계매개변수들이 토크의 변동성분에 미치는 영향을 파악하고, 실험을 통하여 고정자 코일 저항과 축전기용량의 영향을 확인하였다. 추가적으로 다구찌방법을 이용하여 예시적인 한 슬립조건하에서 토크의 변동성분을 줄일 수 있도록 개선된 전동기 설계변수를 제시하였다.

## 2. 전동기 토크에 대한 기본이론

축전기형 유도전동기의 토크 특성을 해석하기 위해 2회전 자계이론과 고정 기준좌표계 이론을 적용하여 전압방정식 및 토크 관계식을 유도하였다. 2회전 자계이론은 전원주파수 주기동안 평균화된 전류-전압-토크 관계를 얻기 위한 것이고, 고정 기준좌표계 이론은 전원주파수 기간동안 변화하는 전류-전압-토크 관계를 얻기 위한 것이다. 두 이론의 기본적인 가정으로는 고정자와 회전자의 기자력파가 공간적으로 정현파로서 분포하고, 고정자와 회전자 사이의 공극은 일정하며, 자기포화현상을 무시할 수 있을 정도로 전동기는 선형성을 유지한다는 것 등을 들 수 있다.

### 2.1 2회전 자계이론<sup>(2,3,4)</sup>

2회전 자계이론은 단일 축상에 있는 하나의 회전자계를 크기가 1/2이고 방향이 반대인 두개의 회전자계로 분리할 수 있다는 사실에 근거를 두고 있다. 즉, 한 회전자계를 정방향 회전자계와 역방향 회전자계로 분리하여 독립적으로 생각할 수 있다. 주코일과 부코일 각각에 두개의 회전자계가 생성되는 것을 고려한 전압강하와 주코일과 부코일의 상호작용으로 생기는 전압강하를 고려하면 다음과 같은 전류-전압방정식을 얻을 수 있다.<sup>(2,3)</sup>

$$\begin{Bmatrix} V_m \\ V_a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_m + Z_f + Z_b & -jN(Z_f - Z_b) \\ jN(Z_f - Z_b) & Z_a + Z_c + N^2(Z_f + Z_b) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_m \\ I_a \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 주코일과 부코일의 권선비이고,  $Z_m$ ,  $Z_a$ ,  $Z_c$ 는 각각 주코일 임피던스, 부코일 임피던스, 축전기 임피던스로서 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_m &= r_m + jx_m \\ Z_a &= r_a + jx_a \\ Z_c &= jx_c \end{aligned} \quad (2)$$

또한  $Z_f$  및  $Z_b$  는 각각 정방향 임피던스 및 역방

항 임피던스로서 다음과 같이 정의된다.

$$Z_f = R_f + jX_f = \frac{0.5jx_M(r_r/s + jx_r)}{r_r/s + j(x_r + x_M)} \quad (3)$$

$$Z_b = R_b + jX_b = \frac{0.5jx_M(x_r/(2-s) + jx_r)}{r_r/(2-s) + j(x_r + x_M)} \quad (4)$$

위의 식(1)에서 구해진 주코일전류  $I_m$ 과 부코일 전류  $I_a$ 를 이용하여 정방향 전류성분  $I_f$ 와 역방향 전류성분  $I_b$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$I_f = I_m - jNI_a \quad (5)$$

$$I_b = I_m + jNI_a \quad (6)$$

전원주파수 주기동안에 평균적으로 발생하는 토크  $T_m$ 은 공극을 통하여 회전자에 전달되는 정방향 전력성분에서 역방향 전력성분을 빼고 회전수인  $\omega_s$ 로 나누어 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} V \\ V_D \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r_m + (x_m + x_M) \frac{p}{\omega_b} & 0 & x_M \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & r_a + (x_a + x_M) \frac{p}{\omega_b} & 0 & x_M \frac{p}{\omega_b} \\ x_M \frac{p}{\omega_b} & -\frac{1}{N} x_M \frac{\omega_r}{\omega_b} & r_r + (x_r + x_M) \frac{p}{\omega_b} & -\frac{1}{N} (x_r + x_M) \frac{\omega_r}{\omega_b} \\ -Nx_M \frac{\omega_r}{\omega} & x_M \frac{p}{\omega} & N(x_r + x_M) \frac{\omega_r}{\omega} & r_r + (x_r + x_M) \frac{p}{\omega} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} i_q \\ i_D \\ i_q \\ i_d \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $p$ 는 시간에 대한 미분연산자이고 주코일 전압  $V$ 와 부코일전압  $V_D$ 의 관계는 다음과 같다.

$$V_D = V - \frac{1}{C} \int_0^t i_D dt \quad (10)$$

식(9)로부터 전류를 유도하고, 열손실이 없다는 가정하에 외부에서 공급되는 전체에너지는 자장에 의해 형성되는 위치에너지와 회전자 운동에너지로 변환되는 원리를 이용하여, 회전자에 가해지는 토크를 구하면 극수가  $P$ 인 경우 다음식과 같게 된다.

$$T = \frac{Px_M}{2\omega_b} (i_q i_d - i_D i_q) \quad (11)$$

### 2.3 두 이론의 비교<sup>(7)</sup>

앞에서 언급한 바와 같이 2회전 자계이론에 의해서는 전원주파수 주기동안에 변화하는 전류와 전압 특성을 구할 수 있다. 전자의 경우에는 토크의 변동성분에 의하여 발생하는 회전속도의 변동성분을 무시함으로써 회전속도를 일정한 것으로 간주하게 된다. 본 절에서는 이 두 이론의 비교를 통해 토크

$$T_m = \frac{1}{\omega_s} (|I_f|^2 R_f - |I_b|^2 R_b) \quad (7)$$

한편, 주로 전원주파수  $\omega_b$ 의 두배 성분으로 나타나는 토크의 변동성분  $T_v$ 는 Yokozuka<sup>(4)</sup>가 제시한 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$T_v = \frac{1}{\omega_b} |I_f| |I_b| |Z_f - Z_b| \quad (8)$$

### 2.2 고정 기준좌표계 이론<sup>(5,6)</sup>

좌표계를 Fig. 1에 보인 바와 같이 고정자위에  $m, a$ 축을, 회전자위에  $\alpha, \beta$ 축을 잡고, 회전자를 2상의 등가코일로 표현하여 전압-전류방정식을 유도한 후, 좌표변환을 통하여  $m, a$ 축을  $D, Q$ 축으로,  $\alpha, \beta$ 축을  $d, q$ 축으로 변환하면 다음과 같은 전압방정식이 얻어진다.

의 변동성분을 보다 간단하게 표현하는 식(8)의 타당성을 확인하고자 한다.

여기서, 필요한 전동기 설계매개변수들, 즉,  $r_m, r_a, x_m, x_a, r_r, x_r, x_M$ 의 값들은 다음 절에 설명되는 무부하실험과 구속실험을 통하여 구하였으며, Table 1에 보여진 바와 같다.<sup>(8)</sup> 회전자 자체의 관성모멘트는  $1.023 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ 으로 추정되었으며, 이 자료들을 이용하여 위의 두 가지 방법에 의해 계산한 결과인 시동직후의 회전속도 및 토크는 Fig. 2에 보인 바와 같다. 회전속도의 경우 고정 기준좌표계 이론에 의한 결과는 2회전 자계이론과

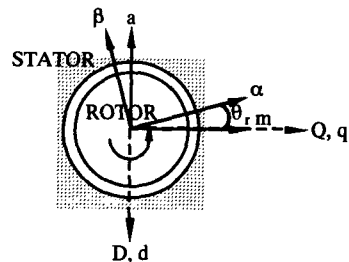
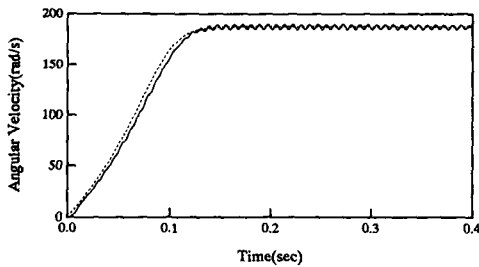


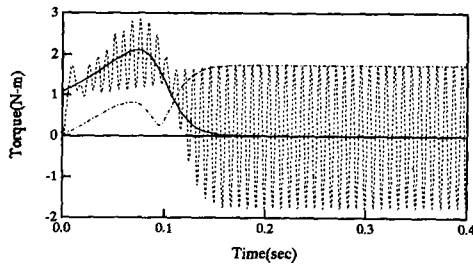
Fig. 1 Reference frame for voltage-current analysis

**Table 1** Parameters of capacitance type induction motor

Parameter	Magnitude	Unit
Supply voltage	200	V
Line frequency	60	Hz
Number of poles	4	
Ratio of no. of turns	1	
Maximum speed	1800	rpm
Main winding resistance	13.4	Ω
Auxiliary winding resistance	13.4	Ω
Rotor resistance	31.75	Ω
Main winding reactance	12.62	Ω
Auxiliary winding reactance	12.62	Ω
Rotor reactance	12.62	Ω
Magnetizing reactance	168.86	Ω
Capacitance	12	μF

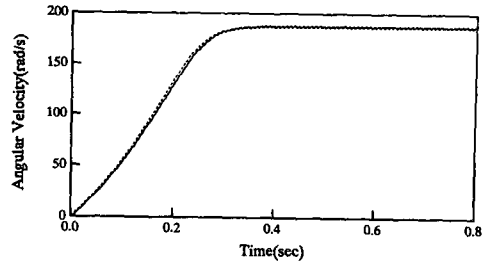


— : By Two Revolving Field Theory  
 - - : By Stationary Reference Frame Theory  
 (a) Angular speed

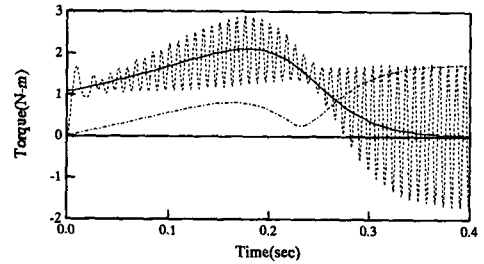


— : Average Torque, - - : Alternating Torque  
 By Two Revolving Field Theory  
 - - : Average Torque, - - : Alternating Torque  
 By Stationary Reference Frame Theory :  
 (b) Torque

**Fig. 2** Comparison of two theories (moment of inertia :  $1.023 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ )



— : By Two Revolving Field Theory  
 - - : By Stationary Reference Frame Theory  
 (a) Angular speed



— : Average Torque, - - : Alternating Torque  
 By Two Revolving Field Theory  
 - - : Average Torque, - - : Alternating Torque  
 By Stationary Reference Frame Theory :  
 (b) Torque

**Fig. 3** Comparison of two theories (moment of inertia :  $2.5 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ )

달리 120 Hz의 변동성분을 가지고 있으며, 토크 또한 이와 관련되어 120 Hz성분을 가지고 있음을 볼 수 있고, 평균치에 있어서는 두 가지 이론이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 실제 운전조건 하에서의 관성모멘트는 전동기 회전자뿐만 아니라 회전축에 고정된 폴리 등을 포함해야 하므로 위의 수치보다 훨씬 커지게 된다. Fig. 3은 폴리를 고려하여 관성모멘트를  $2.5 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$ 으로 증가시킨 후 시뮬레이션을 수행한 결과이다. Fig. 2와 Fig. 3을 비교하여 보면, 관성모멘트의 증가로 인해 정상 상태에 도달하기까지의 시간이 증가하며, 회전속도의 변동성분은 줄어드는 정도가 쉽게 관측되는 반면에 토크 변동성분의 증가는 거의 없음을 알 수 있다.

### 3. 전동기의 설계매개변수 및 토크특성 규명

#### 3.1 설계매개변수 규명

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 우선 설계매개

변수들에 대한 자료가 필요한데, 이를 위하여 무부하실험과 구속실험을 수행하였다. 실험에 사용된 전동기 모델은 AMWAS-250ZTEA(S사)로서 주코일과 부코일에 같은 재료와 같은 권수의 코일을 가지고 있는데, 이는 고정자에서의 임피던스값들이 균형을 이루고 있음을 의미한다. 축전기형 전동기의 구속실험과 무부하실험은, 주코일과 부코일의 설계매개변수가 같으므로, 일반적인 단상 전동기에서와 같이 어느 한 코일을 단락시키고 측정을 수행하면 되는데, 측정결과는 Table 1에 보인 바와 같다.

3.2 토크특성 규명<sup>(9,10,11)</sup>

현재 상업화된 토크센서는 대부분 스트레인게이지를 이용하고 있으며 이에 따라 센서 자체의 고유진동수가 매우 낮은 편이다. (200 Hz 이하) 실제의 경우 전동기 회전자, 폴리 등이 부가적으로 연결되게 되는데 이에 따라 고유진동수가 더욱 낮아지게 된다. 따라서, 일반적인 토크센서를 이용하여 전원 주파수와 관련되어 발생하는 고주파(120 Hz이상)의 토크변화를 측정하는 것은 매우 어렵다.

한편, 공극에서 발생하는 자기플럭스 세기(flux linkage)와 고정자 전류를 측정할 수 있으면 고정 기준좌표계 이론으로 유도된 식에 대입함으로써 공

극에서 발생하는 토크를 간접적으로 추정할 수 있게 된다. 그런데 자기플럭스 세기를 측정하기 위해서는 부가장치(flux coil이나 hall probe 등)를 전동기에 장착시켜야 한다. 이 방법은 한편으로는 실험비용과 관계되며, 또 다른 한편으로는 구조적인 측면에서 실험대상 전동기에의 설치 가능성여부와 관련되기 때문에, 본 논문에서는 다음에 설명하는 바와 같이 코일의 전압과 전류를 측정함으로써 자기플럭스 세기를 계산하고 이를 이용하여 토크를 간접적으로 추정하는 방법을 사용하였다.

고정 기준좌표계 이론에서 고정자쪽의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V = r_{mi}i + \frac{d}{dt}\lambda_Q \tag{12}$$

$$V_D = r_{Di}i + \frac{d}{dt}\lambda_D \tag{13}$$

위 식으로부터 자기플럭스 세기  $\lambda_Q$ 와  $\lambda_D$ 를 유도하면 아래와 같다.

$$\lambda_Q = \int (V - r_{mi}i) dt \tag{14}$$

$$\lambda_D = \int (V_D - r_{Di}i) dt \tag{15}$$

한편, 회전자 전류, 자기플럭스세기, 고정자 전류 사이의 관계는 다음 식으로 주어지는데,<sup>(8)</sup>

$$x_{mi}i_Q = \omega_b \lambda_Q - x_{mi}i \tag{16}$$

$$x_{mi}i_D = \omega_b \lambda_D - x_{Di}i \tag{17}$$

위 두 식(16), (17)과 식(14), (15)를 이용하여 식(11)을 정리하면 토크는 다음 식으로 구해질 수 있다.

$$T = \frac{P}{2} (\lambda_{Di}i_Q - \lambda_{Qi}i_D) \tag{18}$$

실험장치의 개략도는 Fig. 4에 나타나 있다. 분리변환기(isolating transformer)를 사용하여 전원에서부터 전동기를 분리시킨 후, 코일로부터 직접 전압을 측정하였다. 전류측정에는 Hall 소자(전류의 흐름에 의해 철심을 통과하는 자장이 발생하고 이 전류의 세기에 비례하는 자장이 Hall 소자 양단에 자계를 형성하게 되어 전압이 발생함)를 이용한 센서를 사용하였다.

Fig. 5는 시동후 회전자속의 변화에 따른 토크를 보여주고 있다. 여기서 점선과 실선으로 나타낸 것은 2회전 자계이론을 이용하여 구한 것이다. 즉,

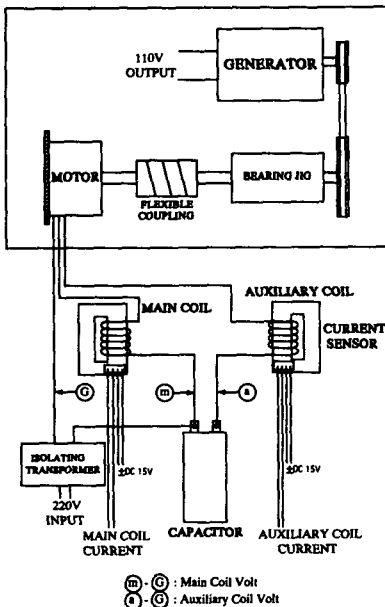
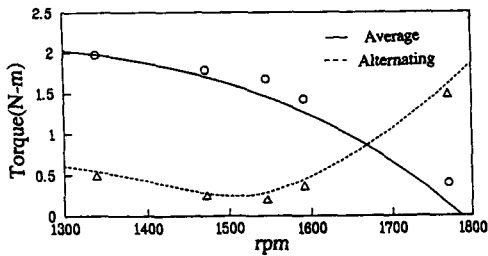


Fig. 4 Experimental set-up for voltage and current measurement



**Fig. 5** Estimated torque versus indirectly measured torque  
Lines : estimated, Points : indirectly measured

축전압에 대하여 식(1)을 Runge-Kutta방법으로 풀어 전류를 구한 후, 식(7)과 식(8)에 대입하여 계산한 결과이다. 한편 5개 회전수에서의 결과는 고정좌표계 이론을 이용한 것으로서, 전류까지 측정하여 자기플럭스 세기를 식(14) 및 (15)에 의해 구한 후 식(18)에 대입하여 얻은 결과이다.

#### 4. 전동기 설계매개변수가 토크의 변동성분에 미치는 영향

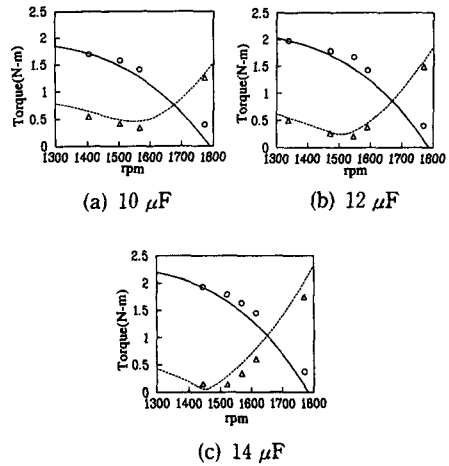
##### 4.1 축전기의 영향

권선비가 1인 전동기가 완전한 2상 전원으로 구동된다면, 토크에서 120 Hz성분은 커지게 된다. 그러므로 토크의 변동성분을 줄이기 위해서는 적절한 용량의 축전기를 선택하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

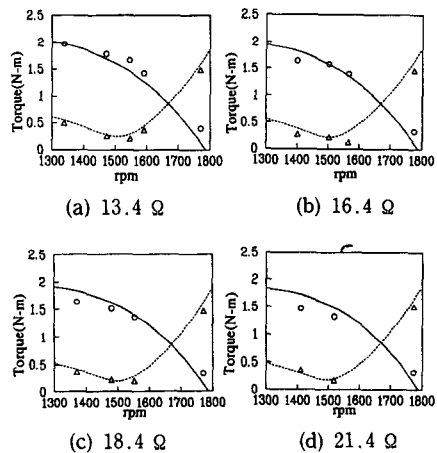
이에 따라 축전기용량을 10  $\mu$ F, 12  $\mu$ F, 14  $\mu$ F로 증가시키면서 토크 특성이 어떻게 변화하는지 살펴 보았다. Fig. 6에 보인 결과에서 알 수 있듯이 축전기 용량이 커지면 평균토크는 커지고, 토크 변동성분은 약 1600 rpm이하에서는 감소하는 반면 그 이상에서는 증가하고 있다. 여기서, 운전속도 범위가 축전기 선정에 중요한 변수가 된다는 사실과, 축전기 용량은 토크의 변동성분과 함께 평균값에도 영향을 미치므로 축전기 용량을 조절하여 토크의 변동성분을 줄이는데 한계가 있다는 사실을 알 수 있다.

##### 4.2 고정자 및 회전자 저항의 영향

다음으로, 고정자와 회전자 저항에 의한 토크 특성변화를 살펴 보았다. 주코일 저항에 3  $\Omega$ , 5  $\Omega$ , 8  $\Omega$ 를 추가하여 얻은 결과인 Fig. 7을 보면, 주코일 저항의 변화는 토크의 평균값이나 변동성분에



**Fig. 6** Effects of capacitance on torque characteristics  
Lines : estimated, Points : indirectly measured

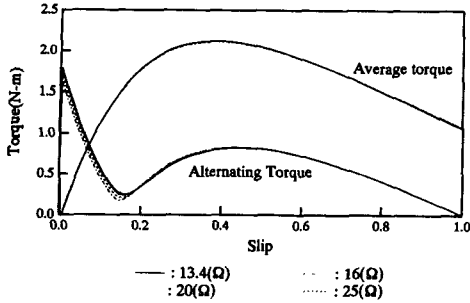


**Fig. 7** Effects of resistance of main coil on torque characteristics  
Lines : estimated, Points : indirectly measured

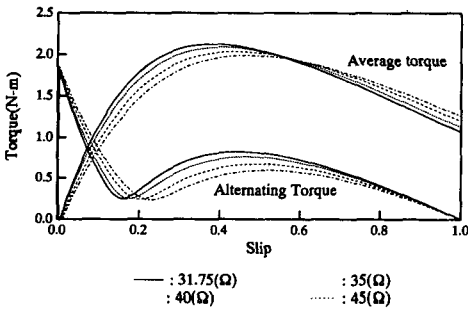
커다란 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8에는 부코일 저항, 회전자 저항, 고정자 및 회전자 리액턴스 및 여자 리액턴스가 토크에 미치는 영향을 슬립에 따라 나타내었는데, Fig. 8(a)에 보인 바와 같이 부코일 저항의 증가도 주코일의 경우처럼 토크의 변동성분에 큰 영향을 미치지 못하고 있다. Fig. 8(b)에는 회전자 저항의 변화가 토크에 미치는 영향을 보여주고 있는데, 상용회전수에 해당하는 범위의 슬립이 0.2이하인 경우, 저

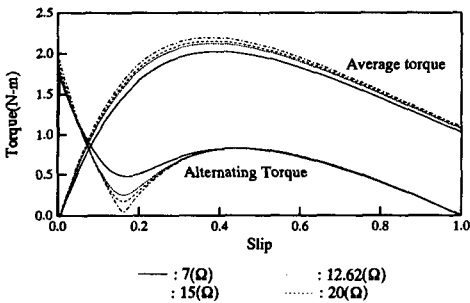
항이 증가할수록 평균토크는 작아지고 토크의 변동 성분은 커지는 반면, 시동토크는 저항의 증가에 따라 커지고 있음을 볼 수 있다.



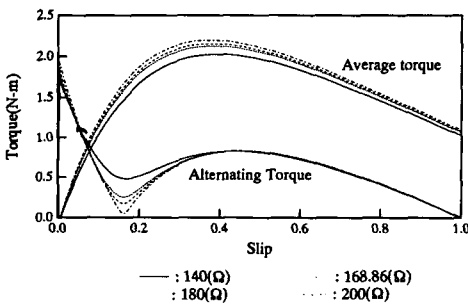
(a) Auxiliary coil resistance



(b) Rotor coil resistance



(c) Stator and rotor resistance



(d) Magnetizing resistance

Fig. 8 Effects of other design parameters on torque characteristics

### 4.3 리액턴스의 영향

고정자와 회전자 리액턴스는 같은 크기인 것으로 가정하여 토크를 계산하였는데, Fig. 8(c)에서 볼 수 있듯이 평균토크는 리액턴스의 증가에 따라 전반적으로 증가하고 있다. 또한 토크의 변동성분은 슬립이 약 0.16인 부분에서는 고정자, 회전자 리액턴스의 증가에 따라 뚜렷이 감소하는 추이를 보이지만, 고속(슬립이 0에 가까운 경우)에서는 오히려 이와 반대의 현상이 일어난다. 다음으로 여자 리액턴스의 영향을 알아보면 Fig. 8(d)와 같은데, 고정자, 회전자 리액턴스의 경우와 비슷하다.

이상에서 전동기의 여러 설계매개변수가 토크 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 축전기용량과 회전자 저항의 영향이 크다는 것을 알았지만, 어느 하나만을 바꾸어 토크의 특성을 개선하는 것은 어렵다는 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 토크의 변동성분 감소는 많은 경우 평균토크의 감소를 가져오게 되므로, 원하는 평균토크, 시동토크 성능 등을 만족하면서 토크의 변동성분을 줄이기 위해서는 여러 설계매개변수를 모두 고려하여야 한다.

### 4.4 다구찌방법을 이용한 설계 개선

앞 절에서 보인 바와 같이 여러 설계매개변수들이 토크특성에 매우 복잡하게 영향을 미치고 있으므로, 토크특성을 개선시키기 위해서는 여러 변수를 함께 고려하여야 한다. 또한 설계치 자체가 임의의 값이어서는 곤란하고, 기존의 규격인 것이 바람직하다. 이 밖에도 부품제조공정에서 있을 수 있는 설계변수들의 산포도에 의한 영향이 작도록 해야 한다. 이런 목적을 달성하기 위하여 본 논문에서는 다구찌방법<sup>(12,13)</sup>을 도입하였다.

예로서 슬립이 0.08일 때 토크의 변동성분을 줄이기 위한 설계를 수행하였다. 각 설계인자에 대한

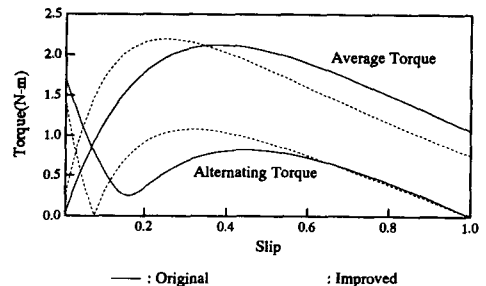


Fig. 9 Improved torque characteristics (Case 1)

**Table 2** Improvement of several parameters by taguchi method

Parameter	Lower limit( $\Omega$ )	Upper limit( $\Omega$ )	Case 1( $\Omega$ )	Case 2( $\Omega$ )
Stator Resistance	10	30	30	14.42
Stator Resistance	0	50	19.25	6.14
Rotor Reactance	0	60	44.21	33.24
Rotor Reactance $\theta$	50	9.13	23.67	
Magnetizing Reactance $\theta$	300	167.41	194.44	
Capacitor Reactance $\theta$	500	259.22	245.60	

Object : Minimization of alternating torque at  $s=0.08$

Constraint : Case 1 Average torque  $\geq 0.927$  N·m

Case 2 (i) Average torque =  $0.927$  N·m (ii) Starting torque  $\geq 1.0$  N·m

산포도는 축전기 리액턴스의 경우  $\pm 5\%$ , 나머지 리액턴스의 경우  $\pm 3\%$ 를 고려하였다. Fig. 9는 목적함수를 토크의 변동성분으로 놓고, 제한조건으로서 토크의 평균값을  $0.927$  N·m 이상으로 부과하여 설계한 결과이다. 그림에서 보는 것처럼 토크의 변동성분은  $0.782$  N·m에서  $0.00545$  N·m으로 크게 줄었지만, 시동토크도 역시  $1.064$  N·m에서  $0.75$  N·m으로 줄었고 평균토크는  $0.927$  N·m에서  $1.47$  N·m로 증가하였다. 따라서 이 경우 부하가 일정하다면 회전속도는 증가하게 되고 이에 따라 토크의 변동성분 역시 증가하게 된다.

그러므로 부하가 일정하다면 설계전의 회전속도로 회전시키면서 토크의 변동성분을 줄이기 위한 재설계가 필요하다. 제한조건으로서 평균토크가  $0.927$  N·m이 되도록 하고 시동토크가  $1.0$  N·m이  $1.14$  N·m이고 슬립  $0.08$ 에서 토크의 변동성분은 상이 되도록 하였다. 이렇게 하여 재설계된 결과는 Table 2와 Fig. 10에 보인 바와 같다. 시동토크는

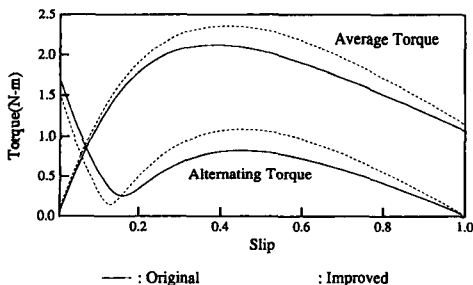
$0.54$  N·m이고 평균토크는  $0.987$  N·m이다.

### 5. 결 론

2회전 자계이론과 고정 기준좌표계 이론을 축전기형 전동기에 적용하여 토크의 변동성분을 구하는 방법을 소개하고, 자계 회전주기동안 회전자 속도를 일정한 것으로 간주하는 2회전 자계 이론이 토크의 평균값 및 변동성분 크기 예측에 있어 고정 기준좌표계 이론과 일치함을 보였다. 변동토크 특성을 실험적으로 확인하기 위하여, 전압과 전류를 모두 측정한 후 위의 두 이론중 후자를 이용하여 토크를 간접적으로 추정함으로써  $120$  Hz성분의 발생사실을 확인하고 그 크기를 얻은 후, 이 결과를 전압만으로 측정하고 전자의 이론에 의해 계산한 변동토크 크기와 비교하였다. 또한 실험과 시뮬레이션의 통하여 여러 설계매개변수가 토크의 변동성분에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과 축전기 용량과 회전자 저항이 중요한 영향을 미친다는 것을 알았으나, 이들 중 어느 한 값의 변화만으로 토크의 변동성분을 효과적으로 줄일 수는 없었다. 하나의 대안으로서 여러 변수를 고려하고 잡음의 영향에 둔감하도록 다구적방법을 도입하여 슬립이  $0.08$ 인 경우에 대하여 예시적인 설계를 수행하였다.

### 참고문헌

- (1) 박병만, 1993, "세탁기 설계를 위한 연구," S



**Fig. 10** Improved torque characteristics (Case 2)



- 사 위탁연구 보고서, 한국과학기술원 기계공학과.
- (2) Veinott, Cyril G., 1977, "Performance Calculation on the Two-Speed Shunted Capacitor Motor," *IEEE Trans.*, PAS-96(4), pp. 1132~1136.
- (3) Matsch, Leander W., 1987, *Electromagnetic and Electromechanical Machines*, John Wiley & Sons Inc., New-York.
- (4) Yokozuka, T., 1971, "Alternating Torque Characteristics of The Condenser Motor," *John IEEJ.*, 91(3), pp. 501~5010.
- (5) Krause, Paul C., 1987, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill Co., New York.
- (6) Krause, Paul C., 1965, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines," *IEEE Trans.*, Pas-84(11), pp. 1025~1037.
- (7) Gross, Charle A. and Nelms, R. M., 1991, "A Comparison of Two Analytical Methods of Determining the Starting Transients of a Single Phase Induction Machines," *Electric Machines and Power System* (19), pp. 705~712.
- (8) 고홍석, 1993, "축전기형 전동기의 토크에 대한 특성분석과 변동성분의 감소를 위한 연구", 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문
- (9) Hancock, Norman, and Napoleon, 1974, *Matrix Analysis of Electrical Machinery*, Pergamon Press Inc., Toronto.
- (10) Hsu, J. S., Woodson, H. H. and Weldon, W. F., 1992, "Possible Errors In Measurement Of Air-gap Torque Pulsations Of Induction Motors," *IEEE Trans.*, EC-7(1), pp. 202~208.
- (11) Lipo, Thomas A, and Chaw, Kwong C., 1986, "A New Approach To Flux and Torque-sensing In Induction Machines," *IEEE Trans.*, IA-22(4), pp. 731~737.
- (12) 김추호, 1993, "다구찌방법을 이용한 컴퓨터 원용 강건설계기법의 개발", 한국과학기술원 기계공학과 석사학위 논문
- (13) 염봉진, 서순근, 1991, 실험계획 및 분석: 다구찌방법과 직교배열의 활용, 한국과학기술원 산업공학과.