

방향성 자기재료에 의한 유도전동기의 효율향상설계에 관한 연구

A Study on the Design of High Efficiency Induction Motor by Grain-oriented Magnetic Cores

黃煥文* · 李千** · 安珍雨§ · 朴漢雄§
(Young-Moon Hwang · Il-Chun Lee · Jin-Woo Ahn · Han-Woong Park)

요 약

비대칭자화리액턴스를 가진 분상유도전동기에서는 기동토크가 발생하며 고정자의 주권선자속과 회전자의 속도전압에 의한 교차자계자속에 의하여 평형상태운전을 할 때 고효율운전을 하게된다. 기동시에는 속도전압이 발생하지 않으므로 불평형운전을 하게 되며 이를 분상권선에 의하여 속도전압을 보상하게 한다. 그러나 이러한 보상은 가변적이어야 하므로 철심의 비대칭구조에 의한 릴렉턴스토크를 활용하여 보상의 가변성을 위화하는 전동기구조가 실용화되는 추세에 있다. 본 연구에서는 전동기 철심재료로서 방향성규소강판을 이용하여 철심구조를 효과적으로 비대칭화시킨 전동기를 제안하고, 이론적 해석에 의해 고효율의 전동기로 설계할 수 있음을 추리한 후, 이를 실험적 고찰에 의해 입증하였다. 결과적으로 영구커패시터운전형 유도전동기에서는 특정동작점에서 자기회로의 비대칭효과에 의한 평형운전조건을 갖게 하여 고효율화시키고, 동시에 병형성규소강판의 고투자율과 저손실특성에 의하여 재료의 절감은 물론 저손실 고효율의 전동기특성을 갖게 함을 알 수 있었다.

Abstract- A split-phase induction motor with asymmetrical magnetizing reactance axes develops starting torque and its efficiency can be high under certain conditions. In this paper, one method of producing the asymmetry of magnetizing reactance axes is described. The grain-oriented silicon steel core is used to produce the asymmetric axes instead of non-oriented silicon steel core which is used in general motors. The optimum design method for the motor is suggested and analyzed. To verify this suggestion, the permanent capacitor run type induction motors are designed to be driven at balanced condition by its asymmetrical effect, and then the oscillating torque due to the asymmetry of motor structures are analyzed. Tests of the sample motor have shown good performance comparable to ordinary types. This motor structure can be used where high efficiency and reliability are required, and also the amount of core materials can be reduced due to its high permeability.

1 서 론

최근, 전동기구조는 점차 소형화, 고기능화 및 고효율화되는 추세에 있다. 현재 고기능화된 전동기 구조로서는 서어보구동용의 영구자석형전동기가 대부

* 正 會 員 : 釜山大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 ** 正 會 員 : 東明專門大學 電氣科 · 副教授
 § 正 會 員 : 釜山大 大學院 電氣工學科 博士課程
 接受日字 : 1989年 1月 17日
 1次修正 : 1989年 3月 19日

분으로, 그 개발과 활용이 다각적으로 행하여지고 있으나, 아직도 소형전동기구로서의 이용은 분수마력단상유도전동기가 그 주류를 이루고 있다

분수마력전동기인 단상유도전동기는 종래에는 가장 저렴하고 간편한 전동기구로서 이용되어 왔으나, 이용대수가 많아지면서 점차 고품질의 것이 요구되고 있다. 전동기구의 품질을 향상시키는 조치로서는 출력특성의 개선, 손실의 절감 및 보조장치의 단순화에 의하여 이를 고효율화 하는데 주안점을 두고 있다

보조장치의 단순화조치로서는 분상권선의 비대칭 배치에 의한 기동토크특성의 개선¹⁾, 기동장치의 부점침화 및 영구콘덴서운전형의 채택 등이 있다. 손실의 절감조치로서는 공극자속의 고조파성분의 억제²⁾의 자기회로의 비대칭화³⁾에 의한 철심재료의 절감 등이 있다. 또한, 출력의 개선은 손실의 절감과 고조파토크의 억제, 그리고 사용재료의 고품질화로 이루어질 수 있을 것이다

본 연구에서는 이상과 같은 여러가지 조치를 검토한 바, 전동기의 철심재료를 방향성규소강판으로 하여 자기회로를 효과적으로 비대칭화시키고 사용재료를 고품질화시키며 기동장치의 단순화와 동작점에서의 평형운전화를 위하여 영구콘덴서운전형을 채택한 전동기구에 대하여 해석하고 그 적정설계이론을 확립시킨 후, 이를 공시전동기에 의하여 실증하였다

2 방향성규소강판을 사용한 전동기자기회로의 구성과 특징

2.1 자기회로의 비대칭성에 의한 릴렉턴스 토크의 활용

단상교류전동기는 일반적으로 분수마력전동기로서 이용되고 있으며, 이러한 전동기는 기동토크를 보상하기 위하여 콘덴서 등을 직렬로 한 분상권선을 필요로 한다. 이들의 분상권선의 역할은 회전자에서 속도전압에 의한 교차자계 발생을 보상하는 것으로, 기동점에는 속도전압이 없으므로 크게 보상하고, 정상운전점에서는 속도전압이 존재하므로 보상을 적게 하거나 하지 않아도 되는 특성을 갖는다. 그러므로 분상권선은 속도에 따라 가변되어야 한다. 이러한 보상정도의 가변을 완화하기 위하여, 자기회로의 비대칭성에 의하여 나타나는 릴렉턴스토크를 활용하는 전동기구가 비대칭전동기

이다. 현재 준분수마력(Subfractional horsepower) 전동기에서는 릴렉턴스토크의 활용만으로 분상권선을 생략하는 경우도 있으며, 점차 분수마력 전동기에서도 그 효과를 활용하여 적정한 분상권선정수의 가변정도를 완화하는데 이용하고자 하는 추세에 있다. 그리하여 고기동토크-고효율운전을 위해 Two-value capacitor 형 전동기에서 Permanent-split single-value capacitor 형 전동기로 개발방향이 이행되어가고 있다. 이는 전동기제작에서의 재료비의 절감과 기동방법의 단순화로 생산원가의 절감과 고효율운전의 효과를 함께 얻고자 함에 있다

2.2 전동기의 자기회로의 비대칭화

분수마력 단상유도전동기의 자기회로는 그림 1 (a)와 같은 동심형고정자철심이 일반화 되어 있으나, 그림 1 (b)와 같은 비동심형 고정자철심에 이형 slot (Crazy slot)를⁴⁾ 갖는 전동기도 실용화되고 있으며 이것이 비대칭성 효과를 활용한 대표적인 단상유도 전동기의 하나이다. 자기회로의 모양은 주권선축방향의 자기저항은 적게, 보조권선축방향의 자기저항은 크게 하였으며, teeth의 방향 또한 주권선축방향으로 향하게 하였다. 또한 고정자의 yoke에 스트리트형slot을 갖게 하여 주권선축의 자속과 보조권선축의 자속의 효과를 확실하게 분할하여 작용하게 하였다. 즉 자속의 작용효과의 비대칭화를 극대화하게 한다. 그러나 이러한 이형slot 구조는 공극자속분포에 불규칙한 slot고조파자속을 갖게 함으로써 고조파토크의 유발과 철손의 증가를 갖게 되

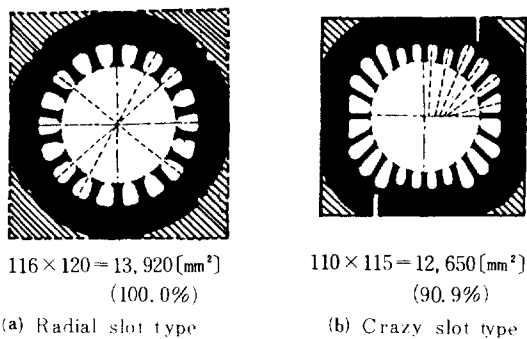
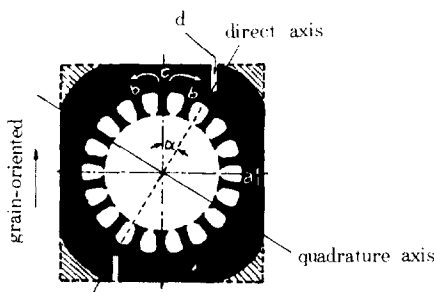


그림 1 단상유도전동기의 고정자편칭 (a) 방사형 (b) 이형
Fig. 1 Stator punchings of single-phase induction motor, (a) Radial slot type (standard), (b) crazy slot type.

고, 전통기계작업에는 권선작업을 어렵게 하는 것이 큰 결점으로 되어 있다

본 연구에서는 그림 2에서와 같이 철심의 공극축 slot은 동일한 형태로 하는 대신, 방향성규소 강판으로써 그 압연방향을 주권선축에 일치시켜 자속의 작용효과를 비대칭화시키고 각 teeth의 기자력분포를 정현파화시킨다. 이때 주권선축의 teeth의 자속분포는 증가하나 방향성규소강판의 최대자속 축에 해당하므로 쉽게 포화되지 않는다. 그리하여 주권선축의 자화리액턴스는 증가하고 반면에 압연방향과 직각인 보조권선축의 자화리액턴스는 감소하여 자기회로가 비대칭화 된다.



$$114 \times 110 = 11, 000 [\text{mm}^2] (79. 0\%)$$

그림 2 방향성규소강판을 사용한 영구분상 콘덴서형 유도전동기의 고정자 펀칭

Fig. 2 Stator punching of split phase capacitor-run type induction motor using grain-oriented electrical steel.

(A) 방향성규소강판철심에 의한 고정자철심의 설계

유도전동기와 같은 회전형 전동기구는 공극에서의 자속분포가 정현파분포가 되도록 철심구조와 권선배치를 하는 것이 바람직하다. 이는 자속분포에 의한 회전자에의 유기전압 및 회전속도전압에 고조파성분이 포함되지 않도록 하기 위한 조치이다. 이때 고정자에는 주권선과 보조권선을 설치하되, 분상기자력을 위하여 보조 권선에 직렬로 커패시터를 이용한다. 여기서, 보조권선의 각 정수조정은 어떤 특정한 동작점, 예를들면 기동점이나 정격전부하 또는 2/3전부하 동작점에 평형조건을 갖도록 동작설계를 하며, 이때의 보조권선의 정수조정은 주권선축 설계정수를 기준으로 하여 행한다. 그리하여, 전동기의 동작특성은 주권선축의 전기적 및 자기적 설계정수에 의해 좌우되므로 주권선축의 설계가 적

정하게 이루어져야 한다. 다만, 공극주변에서의 회전자계 분포가 주권선축 이외의 자기회로축에서도 원형회전자계가 이루어 질 수 있는 조건을 구비하고 있는가를 검토하여야 한다.

방향성규소강판을 이용한 비대칭전동기의 설계조건으로는

- (1) 주권선축에서의 자속분포를 방향성철심의 최대자속밀도축과 일치하게 한다
- (2) 전동기의 공극과 고정자 및 회전자의 각 teeth의 기하학적구조는 동일하게 한다. 이는 권선작업을 기계화시킬 때 Crazy slot에서의 권선작업이 어려운 결점을 완화시킨다
- (3) 주권선의 코일분포는 정현파분포권선으로 한다
- (4) 고정자의 yoke는 그림 2에서와 같이 최대자속 방향으로 작용하는 a부위는 단면적을 적게, b부위는 단면적을 크게 한다. 다만, c부위는 주권선에서의 자속통과량이 적으므로 단면도 적게 할 수 있다. 이러한 구조의 고정자의 철심은 외각치수를 구형으로 되게 함으로서 철심재료를 20% 정도 절약하게 한다
- (5) 고정자의 yoke에 슬릿 slot(d부위)를 설치한다. 이는 비대칭축 철심으로 된 전동기에서의 등가권선축비대칭각 α 를 갖게 하는 효과와 직축 및 횡축의 등가자리액턴스의 비를 크게 하는 작용을 하게 한다

여기서, (1), (2) 및 (3)과 같이 하면, 주권선축에서의 정현파인가전압에 대한 정현파역기전력 즉 정현파자속분포의 형성을 위한 각 teeth에서의 기자력은 정현적으로 분포하게 된다. 동시에 고정자 및 회전자전류도 고조파성분이 억제되어 고조파토크의 발생이 감소된다. (4)의 경우의 철심재료절감은 동시에 철손의 감소를 가져오게 되어 고효율화에 크게 기여한다.

(B) 방향성철심을 이용하였을 때의 정현파기자력 분포

무방향철심(non-oriented core)으로 고정자 및 회전자의 teeth 및 slot를 대칭으로 구성하고 권선의 배치를 정현파분포로 하여도 각 teeth 부위는 철심의 포화특성에 의하여 주권선축부위의 teeth는 포화영역에 들어간다. 즉, 공극의 자속분포를 그림 3의 (A) 곡선과 같이 할 때 소요기자력분포는 (C) 곡선과 같이 첨두파분포가 되어 고조파기자력을 갖는다. 이는 회전자에 고조파전류를 유발하여 고조파토크를 유발하고, 포화특성에 의한 철손을 증가시키는 요인이 된다. 그러나, 방향성철심(grain-oriented co-

re)을 이용하되 철심의 최대자속방향을 주권선축과 일치시키게 되면, 각 teeth에서의 소요기자력 분포는 그림 3의 (B) 곡선과 같이 정현파에 가까운 기자력분포를 갖게 되고 평균소요기자력도 1/3정도로 줄어들게 된다. 그러므로 회전자전류의 고조파성분의 발생율도 상당히 억제되어 고조파토크 발생이 현

격히 감소하게 된다. 즉 철심손실 및 고조파손실이 동시에 감소하게 되어 고효율의 전동기특성을 갖게 된다.

(C) 비대칭자화리액턴스의 산정

비대칭자화리액턴스비 X_q/X_d 를 산정하면 다음과 같다. 자화리액턴스 X_m' 는 일반적으로

$$X_m = \frac{0.5 \cdot \pi \cdot f}{p} (C \cdot K_w)^2 \frac{A_g}{g_e \cdot F_s} \times 10^{-6}$$

$$= x_g \cdot \frac{1}{F_s} \text{ [ohm]} \quad (1)$$

단, $(C \cdot K_w)$: number of effective series conductor

A_g : airgap area, (m^2)

g_e : effective length of airgap, (m)

x_g : magnetizing reactance on airgap, (ohm)

F_s : saturation factor = $\frac{\text{total ampere turns}}{\text{airgap ampere turns}}$

여기서, 포화계수 F_s 는 철심재료 및 압연방향, teeth의 단면적과 길이, yoke의 단면적과 슬릿 slot의 유무에 따라 달라지며, 전동기의 기자력설계에 의하여 산정된다. 그러나 단상유도전동기에서 그림4의 무방향성철심(non-oriented core)을 이용할 때의 값은 일반적으로

$$F_s = 1 + \frac{\text{철심기자력}}{\text{공극기자력}} = 1 + f_s = (1.25 \sim 1.35) \quad (2)$$

의 값을 갖는다.

지금, 직축상에서의 포화계수 F_{sa} 는 방향성철심을 이용할 때 소요철심 기자력이 감소하므로(그림 4에서는 1.8wb/m²일 때 1/2.5로 감소) 주권선축 자속밀도와 철심재료에 따라 달라진다. 이때 감소계수를 k_s 라 하면 F_{sa} 는

$$F_{sa} = 1 + k_s \cdot f_{sc} \quad (3)$$

이다. 단, f_{sc} 는 방향성철심에서의 평균기자력/공극기자력이다. 횡축상에서의 포화계수 F_{sa} 는 방향성철심의 최대자속축과 직각인 축에서의 것으로, 그림 4에서 보는 바와 같이 무방향성철심과 거의 같은 철심자화기자력이 소요된다. 그리고 횡축 yoke 상의 자속통로에는 슬릿 slot가 존재하므로

$$F_{sa} = 1 + \frac{f_{sc}}{k_s} + \frac{g_s}{2} \quad (4)$$

고로 식(1)에서 X_q/X_d 는

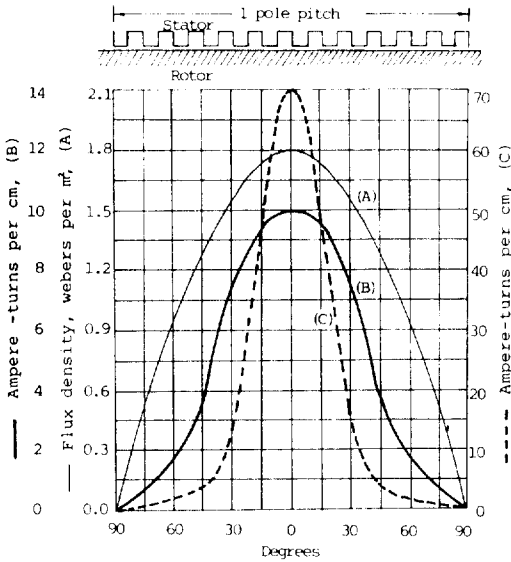


그림 3 방향성철심에서의 자속분포(A) 및 기자력 분포(B)와 무방향성철심에서의 기자력분포(C)

Fig. 3 Flux(A)and mmf(B)in some teeth used grain-oriented core. (C) curve is mmf in non-oriented core.

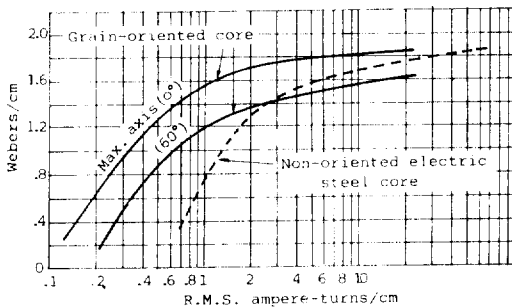


그림 4 유도전동기 고정자차에서의 포화곡선

Fig. 4 Saturation curve of some teeth for induction motor.

$$\frac{X_q}{X_d} \approx \frac{1+k_s \cdot f_{sc}}{1+f_{sc}/k_s+g_s/2}, \quad g_s: \text{yoke slot의 간격} \quad (5)$$

로 된다. 그림 5는 X_q/X_d 에 대한 yoke slot의 길이 g_s 의 영향과 방향성 철심에서의 기자력감소율 K_s 에 대한 효과를 나타낸 곡선으로, g_s/g_e 에 대하여는 그 값이 커질 수록 비대칭효과는 커지나 동시에 고조파자속의 발생이 증대할 것으로 보아 $g_s/g_e < 2$ 인 범위가 적당하며 오히려 기자력의 감소율 K_s 를 크게 하는 방법이 효과적일 것이다.

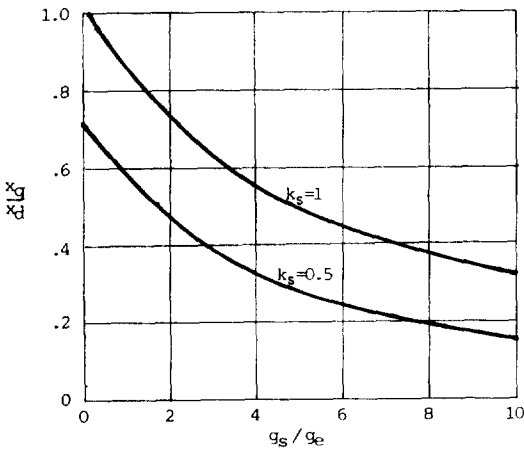


그림 5 계자슬롯과 기자력에 대한 자화리액턴스의 비

Fig. 5 Magnetizing reactance ratio versus yoke slot and ampere-turns factor.

3. 비대칭 자기회로를 가진 전동기에 대한 적정설계

3.1 전동기정수의 적정설계방식

영구극면서운전형 유도전동기와 같은 분수마력전동기에서는 운전점에서 고효율 운전을 하기 위하여는 주권선의 적정설계와 보조권선에 의한 평형운전조건을 갖도록 하여야 한다.

(A) 주권선설계정수

분수마력유도전동기의 적정설계에서는 여자리액턴스 X_m , 주권선저항 R_m , 주권선누설리액턴스 X_l , 회전자저항 R_2 , 회전자누설리액턴스 X_2 , 사이에 일정한 설계정수관계가 성립한다. 즉⁵⁾

$$\begin{aligned} R_m/X_m &= 0.02 \sim 0.03, & X_l/X_m &= 0.03 \sim 0.04, \\ X_2/X_m &= 0.03 \sim 0.04, & R_2/X_m &= 0.04 \sim 0.08 \end{aligned} \quad (6)$$

인 적정치를 갖는다. 이 중에서 R_2/X_m 의 값은 토오크-속도특성의 운전조건을 조정하게 되므로, 이를 동작설계정수라고도 한다.

(B) 평형운전조건과 보조권선설계정수

보조권선설계정수는 주권선설계정수에 종속된 정수로서, 주로 평형운전상태의 동작속도를 조정하게 한다. 즉, 주권선전류 i_m 과 주권선에 직각으로 배치된 보조권선전류 i_m' 와의 사이에 $-j a i_a = i_m'$ 인 관계가 성립할 때 그 동작 속도에서 원형회전자계를 이루어 평형운전상태가 된다.

보조권선수/주권선수의 권선비를 $N_a/N_m = a$ 라고 하고 보조권선커패시턴스의 리액턴스를 X_c 라 할 때

$$a = \frac{B \cdot V_m - K_a \cdot R_m \cdot I_m^2}{A \cdot V_m - R_m \cdot I_m^2} \quad (7)$$

$$X_c = \frac{a \cdot V_m - B \cdot R_m \cdot a (K_a - a)}{A} \quad (8)$$

단, V_m : 주권선인가전압[V]

I_m : 주권선전류실효치[A]

K_a : 주권선코일단면적 / 보조권선단면적

A : 주권선전류의 실효성분[A]

B : 주권선전류의 리액티브성분[A]

일 때 정격부하속도에서 평형운전상태가 된다. 여기서 평형운전조건은 a 와 X_c 가 동시에 식 (7) 및 (8)의 조건을 충족시켜야 하므로, X_c 만으로 또는 a 만으로는 평형운전조건을 조정하게 할 수는 없다.

3.2 방향성철심을 이용한 비대칭전동기의 특성해석

(A) 특성산정조건 및 특성해석식

방향성철심을 이용한 비대칭전동기는 다음과 같이 설계정수를 산정하여 특성해석을 행한다.

(1) 횡축리액턴스 X_q 는 무방향성철심인 경우의 적정리액턴스 X_m 의 값으로 취한다. 즉 $X_q = X_m$ 로 한다.

(2) 직축리액턴스 X_d 는 그림 5에서와 같이 고정자철심구조에 따른 X_q/X_d 의 설계정수에 의하여 선정한다.

(3) 그림 6에서와 같이 자기회로의 직축(yoke slot 축)과 분포권선으로 된 주권선축과의 사이각을

α 로 한다.

- (4) 직축과 분포권선으로 된 보조권선축과의 사이 각을 β 로 한다.
- (5) 정격출력인 V_M/X_m 에 의하여 결정되며, 출력은 이 값이 작을수록 커진다. 그러므로 빙형성전 심을 이용하였을 때는 $K_m V_M/X_m$ (여기서 $K_m = X_q/X_d = X_m/X_d$)로 되어 출력의 증가를 기지운다.

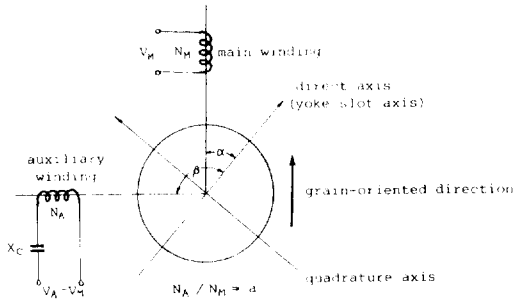


그림 6 비대칭전동기에 대한 자기회로축과 권선축의 배치
Fig. 6 Location of magnetic circuit and winding axis for asymmetrical induction motor.

(6) 정격부하운전점에서의 빙형소진은 a 와 X_c 를 조정하여 그 적정치를 선정한다. 이때 정격부하운전점은 37% 최대토크에서의 출력으로 선정한다.

이상과 같은 조건에서 비대칭축 유도전동기의 특성방정식⁷은 다음과 같이 된다.

\dot{V}_M	$R_M + j(X_{M1} + X_{MA}) + j(X_d \cos^2 \alpha + X_q \sin^2 \alpha)$	$jX_{MA} \cos(\beta \cdot \alpha) + j(X_d \cos \alpha \cos \beta + X_q \sin \alpha \sin \beta)$	$jX_d \cos \alpha$	$jX_q \sin \alpha$	I_M
\dot{V}_A	$jX_{MA} \cos(\beta - \alpha) - j(X_d \cos \alpha \cos \beta + X_q \sin \alpha \sin \beta)$	$R_A/a^2 + j(X_{A1}/a^2 + X_{MA}) - j(X_d \cos^2 \beta - X_q \sin^2 \beta) - jX_c/a^2$	$jX_d \cos \beta$	$jX_q \sin \beta$	\dot{I}'_A
\circ	$-(1-s)X_q \sin \alpha + jX_d \cos \alpha$	$-(1-s)X_q \sin \beta + jX_d \cos \beta$	$R_2 + (X_{2d} + X_d) + X_d$	$(1-s) \cdot (X_{2q} + X_q)$	\dot{I}'_R
\circ	$(1-s)X_d \cos \alpha + jX_q \sin \alpha$	$(1-s)X_d \cos \beta + jX_q \sin \beta$	$(1-s) \cdot (X_{2d} + X_d)$	$R_2 + j(X_{2q} + X_q)$	\dot{I}'_R

(9)

식(9)에 각 전동기정수에 대하여 각각 전류치를 산정한 후, 전동기의 제특성을 구한다. 이때 정수의 값은 식(6)에서 선정하고, 115(V), 2(극), 1/3

[HP]에 대하여 $X_m=61.15(\text{ohm})$ 의 값을 취한다.

(B) Yoke slot의 배치각에 대한 특성해석

빙형성구조장부전심에 의하여 지속분포를 비대칭화시킬 때를 릴랙티스토포오크의 효과적인 작용을 위하여 주권선권선축과 yoke slot 배치축 사이에 적정 이상각(適定移相角)을 갖게 한다. 그림7은 이상각 α 에 대한 정격부하출력점에서의 효율특성곡선이다. 해석결과에 의하면, 이상각 α 는 $\alpha=30^\circ \sim 45^\circ$ 범위가 적당하며 X_q/X_d 외도 상관관계가 존재한다.

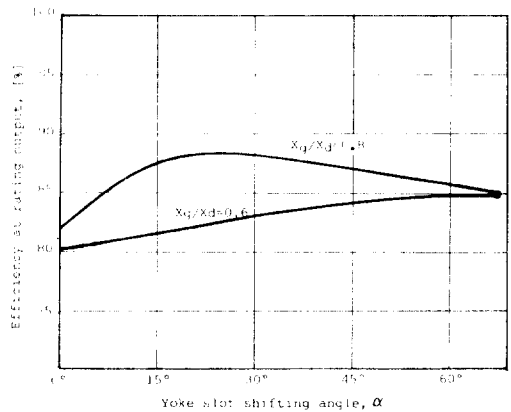


그림 7 α 와 X_q/X_d 에 대한 정격출력에서의 효율 특성.

Fig. 7 Efficiency curves versus α and X_q/X_d at rating output.

(C) 적정 이상각에 대한 특성해석

그림 8에서 적정 이상각으로 $\alpha=35^\circ$ 를 선정하여 그림 2와 같은 고정자전심설계를 하였을 때의 전동

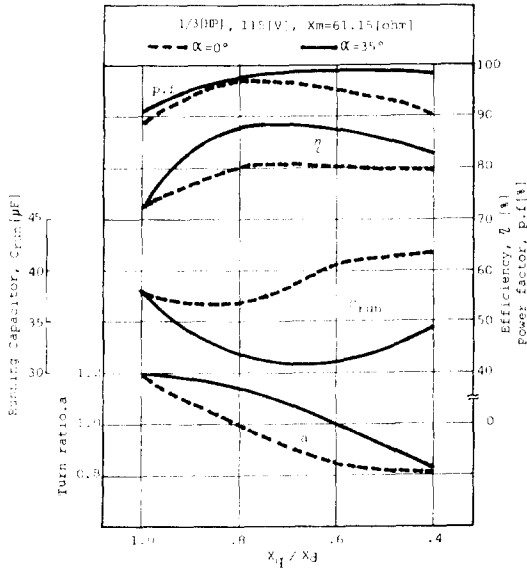


그림 8 정격출력점에서 평형운전조건을 갖는 설계 정수 및 동작특성- X_q/X_a

Fig. 8 Design coefficient and running characteristics vs. X_q/X_a for balance condition at rating output.

기의 제특성을 산정하면 다음과 같다. 이때 β 는 $\beta = \alpha + 90^\circ$ 로 하여 주권선과 보조권선과의 배치각은 대칭 90° 로 하였다. $90^\circ < \beta - \alpha < 130^\circ$ 일 때는 Red motor⁸⁾에서 보는 바와 같이 기동토크의 증가를 가져올 뿐이고, 이러한 배치각에서는 고조파토크의 증가가 예상되므로 $\beta - \alpha = 90^\circ$ 로 한다.

한편, 진동기는 동작부하점에서 평형운전 조건을 갖도록 할 때 고효율 운전을 하게 된다.

지금, 정격부하출력에서 평형조건을 갖도록 하는 방법으로는, 방향성유소강판을 이용한 철심구조에서 적정 X_q/X_a 를 산정하고(그림5 참조), 각 X_q/X_a 에 대하여 식(7)과 식(8)에서 평형조건을 권선비 a 및 X_c , 즉 직렬커패시턴스를 산정하여 적용시킨다. 그림 8은 X_q/X_a 에 대한 평형조건을 권선비 a 및 적정직렬커패시턴스 C_{run} 의 값과 이 값을 적용시켰을 때의 운전효율 및 역률을 표시한다. 이상과 같이 적정설계정수를 검토한바에 의하면,

- (1) 효율 및 역률은 이상각 α 가 존재할 때 향상된다. 그리고, X_q/X_a 가 0.6~0.8일 때가 가장 좋다.
- (2) 권선비 a 는 X_q/X_a 가 1이 아닐 때 $a=1$ 에 가

까워진다. 이는 권선비 a 또한 기자력분포를 비대칭화하는 작용을 하므로, 철심이 비대칭화되면 권선은 대칭화방향으로 조정된다.

- (3) 권선비 a 는 효율 및 역률특성에 직접 영향을 미치게 되는데 권선비가 클 수록 효율특성이 향상된다. 또한 이상각 α 가 $\alpha=35^\circ$ 일때 그 조정 범위가 적어 지고 안정화된다.
- (4) 적정직렬커패시턴스 C_{run} 은 X_q/X_a 를 비대칭화시키려면 그 값이 낮아 지고, 동작특성에 주는 영향이 줄어 든다.
- (5) 결론적으로, 권선속은 자기속, 즉 직속과 회속에 35° 내외의 값을 가질 때 X_q/X_a 를 비대칭화시킬 효과가 나타난다.

3.3 기동 및 운전상태에서의 고조파토크해석

일반적으로 권선조건, 자기회로 및 인가전압이 불평형일 때는 고조파성분의 발생을 유발하는 것으로 되어 있다. 3상전동기에서와 같이 기동 및 운전상태에서 항상 원형회전자계를 갖는 경우에는 고조파토크를 발생하지 않는다. 그러나 단상유도전동기에서와 같이 평형운전상태가 특정속도에서만 존재하는 전동기에서는 기동시에 고조파토크의 발생이 예상된다.

본 연구에서는 연구대상으로 하는 전동기에서도 고조파토크의 발생여부를 검토할 필요가 있다. 앞에서 설명한 것처럼, teeth 및 yoke에서의 철심포화로 인한 기자력분포의 고조파는 방향성유소강판을 이용함으로써 상당히 억제될 것으로 생각한다. 그러나 자하리액티브의 비대칭으로 인한 고조파 특성은 별도로 검토할 필요가 있다.

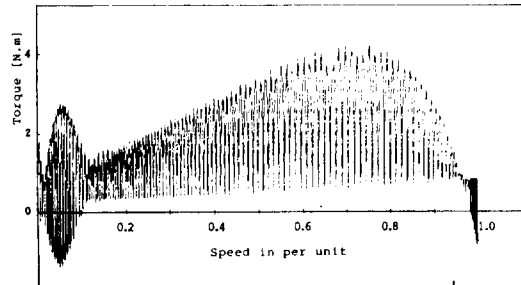
본 연구에서는 식(9)의 미분형 특성식에서 predictor-corrector method⁹⁾를 활용하여 각 비대칭조건에 대한 고조파토크를 해석하여 본 결과는 다음과 같다.

- (1) 그림(9)에서 보는 바와 같이 X_q/X_a 의 값이 적어질수록 기동점에서의 초기고조파는 커진다. 이러한 초기고조파는 평형운전조건을 갖춘 3상전동기에서도 발생하는데 다만, X_q 와 X_a 의 비대칭정도가 클수록 그 진폭이 증가한다는 것이다.
- (2) 평형운전조건을 정격전부하동작점에 있도록 한 결과, 그 점에서의 고조파토크는 발생하지 않는다.
- (3) 가속구간에서의 고조파토크의 진폭은 권선

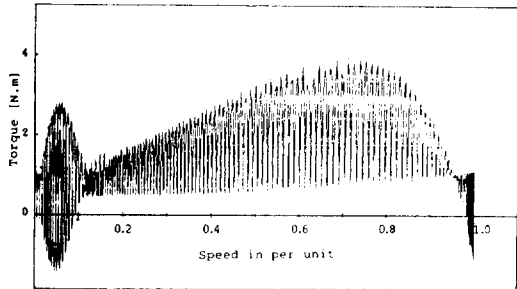
비 a 가 작아질수록 적어진다.

(4) 권선축이상각 α 가 적정치를 가질 때는 고조파 토오크의 진폭은 적어진다.

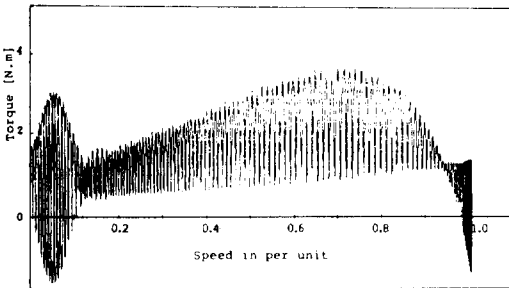
결과적으로, 본 연구에서 대상으로 하는 비대칭 전동기에서의 적정설계 정수를 X_q/X_d 는 0.6~0.8, $a=0.85\sim 1.02$, $\alpha=30^\circ\sim 45^\circ$ 로 하는 등 초기고조파 토오크성분을 제외하고는 그 진폭을 감소시키는 방향으로 되어 있다. 이는 X_q 와 X_d 의 비대칭화에 의한 비대칭전동기에서는 기속 및 정상운전상태에서 비교적 평형운전상태에 가깝게 동작함을 뒷받침하고 있다.



(a) $X_q/X_d=1.00$, $a=1.20$, $\alpha=0^\circ$



(b) $X_q/X_d=0.80$, $a=1.00$, $\alpha=30^\circ$



(c) $X_q/X_d=0.60$, $a=0.88$, $\alpha=30^\circ$

그림 9 비대칭 유도전동기에서의 토오크-속도 동특성

Fig. 9 Torque-speed characteristics during free acceleration for asymmetrical induction motor.

4. 실험적 고찰

전동기특성의 공시전동기에 의한 실험적 고찰에 의하여, 무방향성규소강판(M-24, 0.5mm)과 방향성규소강판(G-15, 0.35mm)을 이용한 두대분의 동일한 치수의 철심을 편칭하고, 방향성규소강판은 다시 그림2와 같이 추가가공한 철심에 의하여, 두대의 공시전동기를 설계제작하여 비교측정하였다.

4.1 설계정수의 선정*

표 1 공시전동기의 설계표

Table 1 Design sheet of sample motors.

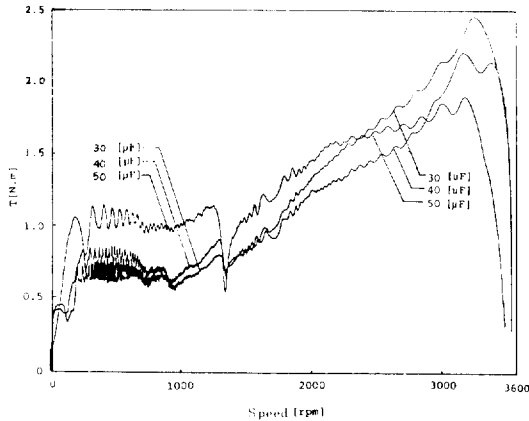
	unit : ohm	
	Grain-Oriented core	Non-Oriented core
철심재료	V.C-15, 0.35mm	M-24, 0.5mm
철심외형치수	114×110mm	116×120mm
철심적층두께	63mm	64mm
공시마력	1/4HP	1/4HP
인가전압	115V	115V
극수	2	2
권선이상각	30°	—
주권선권선수	655	655
코일치수	0.25φ/0.25φ	0.25φ/0.25φ
권선비	1.02	1.02
X_m	X_d 75.5	61.5
	X_q 55.6	
R_m	3.2	3.2
R_A	3.3	3.3
X_{M1}	4.1	4.5
X_{A1}	5.4	4.5
R_2	2.4	2.4
X_2	4.5	4.5

4.2 특성측정과 고찰

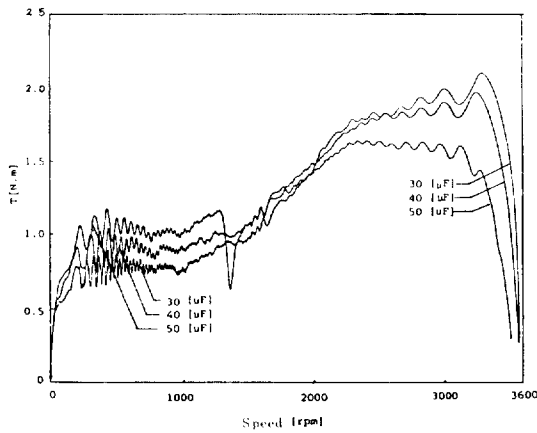
동일 치수의 두대의 공시전동기에 대하여 Strain-gauge type torque transducer와 Digital encoder type speed meter에 의하여 토오크-속도 특성을 측정할 결과는 그림10과 같다.

방향성규소강판의 경우와 무방향규소강판의 경우에 대하여 토오크-속도 특성을 비교검토한 결과

(1) 방향성규소강판을 이용한 전동기의 토오크-속도 특성은 무방향성규소강판에 비하여 정격운



(a) Grain-oriented core



(b) Non-oriented core

그림 10 광시전동기에서의 토크-속도 동특성.
Fig. 10 Torque-speed curves for sample motors.

전점에서의 토크값이 크고 slip이 적다. 이는 효율이 향상된 것을 의미한다.

- (2) 방향성철심의 경우가 무방향성철심의 경우보다 최대토크가 크다는 것은 최고자속 밀도에서도 포화되지 않는 이점과 고조파토크의 억제효과가 있음을 알 수 있다.
- (3) 커패시터의 용량을 키울 때는 일반전동기에서는 기동토크가 커지는 대신 정상운전시의 토크가 낮아진다. 그러나 방향성규소강판의 경우는 정상운전에서의 토크의 낮아지는 비율이 적어, 비대칭성효과가 충분히 있음을 입증한다.
- (4) 기동점에서의 고조파토크는 대칭전동기에서도 나타나는 현상으로 X_g/X_d 의 비대칭도가 크

면 그 값이 커진다. 그림10의 측정특성에서 이러한 특성을 나타내고 있다.

이상과 같이 특성해석, 적정설계 및 실험적 고찰에 의하여 방향성규소강판을 사용한 비대칭전동기에 대한 실용성을 검토한 결과, 고효율 전동기로서 그 실용성이 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

방향성규소강판을 철심재료로 이용한 비대칭전동기를 제안하고, 이에 대한 이론적 고찰에 의해 적정설계방법을 검토한 후 광시전동기에서 이를 실증하였다.

분수마력전동기에서 릴럭턴스토크의 활용성은 이론적으로 규명되어 있으나 방향성규소강판에 의한 자기회로의 비대칭성을 활용한 것은 본 연구가 최초의 것으로 유도전동기 등에는 충분한 실용성이 있다고 본다. 특히 철심재료의 절감과 철손감소의 효과를 가져와 전동기의 고효율화를 이룰 수 있었다.

참고 문헌

- 1) K.Hayashi and F.Funahashi, "The Starting Characteristics of Capacitor Motor with Non-quadrature Stator Windings", IEEJ, vol.79, no.851, pp.1014~1-021, Aug. 1958.
- 2) L.W.Buchanan, "An Equivalent Circuit for a Single-phase Motor Having Space Harmonics in its Magnetic Field", IEEE Trans., vol.PAS-84, no.11, pp. 999~1007, Nov.1965.
- 3) D.Hershberger, J.Oldenkamp, "A Single-phase Induction Motor with One Distributed Winding", IEEE Trans., vol.PAS-87, no.10, pp.1862~1866, Nov.1968.
- 4) C.Veinott, Theory and Design of Small Induction Motors, McGraw-Hill, 1959, pp.275.
- 5) T.Yokozuka, "Analysis of the Capacitor-start Induction-run Motors", IEEJ, vol.91, no.11, Nov.1971.
- 6) P.H.Trickey, "Design of Capacitor Motors for Balanced Operation", AIEE Trans., vol.56, pp.780, 1932.
- 7) 유수호, 이일천, 황영문, "비대칭유도기의 과도특성해석에 관한 연구", 1988년도 추계종합학술대회 논문집, pp.346, 1988.
- 8) T.Koike, "Torque Characteristics of Capacitor Motors with Winding Not in Quadrature", Hitachi Hyoron, vol.50, no.6, pp.2~26, June 1968.
- 9) P.C.Krause, "Simulation of Unsymmetrical Two-phase Induction Machines", IEEE Trans., vol.PAS-84, pp.1028~1037, Nov.1965.