

모노사이클릭기동 유도전동기의 상변환기 리액턴스 결정

論 文

57P-1-7

Determination of Phase Converter Reactances for Monocyclic-start Induction Motor

金 度 進[†] · 左 宗 根^{*}

(Do-Jin Kim · Chong-Keun Jwa)

Abstract - This paper describes a simple and straightforward method to determine phase converter reactances for the monocyclic start induction motor which have two different phase converters. In order to determine two reactances, two kinds of simultaneous equations with two unknown reactances at a specified speed are set up by the condition of balance operation. From these equation, these unknown reactances can be solved directly using the application software without any algebraic calculation. The applicability of this method is investigated by comparing with the known method by using the computed results at the starting and rated speed, and the results show good agreement each other. Using these results, the performance characteristics of this motor are computed and compared with three phase balance operation of induction motor.

Key Words : Monocyclic start induction motor, Phase converter reactance, Performance characteristics

1. 서 론

대칭 3상 유도전동기는 평형 대칭전압으로 운전하는 것이 원칙이지만 불평형 운전의 극단적인 경우로 3상 운전 중 1상이 결상되는 경우나 단상전원만으로 전력이 공급되는 지역에서 단상운전이 필요한 경우가 있다. 이때 단상전원에 의하여 기동회전력을 얻고 전압불평형률을 줄이기 위하여 상변환기로 리액턴스 소자를 하나이상 사용하고 있다.

이 경우 상변환기로 하나의 커패시터 소자를 단상전원이 접속된 상에 대하여 앞선 상의 단자에 접속된 전동기에 대한 연구로 Brown과 Jha는 기동특성의 분석방법을 제시하였고, Murthy 등은 특정슬립에서 전압불평형률이 최소가 되는 조건으로 커패시터의 커패시턴스를 구하는 방법을 제시하였으며, Oliveira는 전압불평형률이 0이 되는 슬립과 커패시턴스를 구하는 방법을 보고하였다.[1-3] Al-Isawi와 Adem은 단상인버터 전원에 의하여 운전될 때의 기동시의 동특성을 해석하였고, 김 등은 두 종류의 스타인메츠결선에서의 권선전류를 분석하였다.[4-5]

전원상이 접속되지 않은 두개의 상에 각각 리액턴스 소자를 접속한 모노사이클릭기동 유도전동기에 대한 연구로 Iri사는 전압평형조건을 사용하여 최적제어를 하였고, Morishita 등은 고정자에 비대칭 권선을 사용한 모노사이클

릭기동 유도전동기를 제시하였으며, Iwahashi 등은 인덕터와 직렬로 사이리스터를 연결하여 희망하는 슬립에서 평형 운전하는 방법을, 그리고 Alwashhi는 전압불평형률이 0이 되는 조건을 이용하여 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스를 사용하여 전동기 특성을 분석하였다.[6-9]

이상의 연구에서는 모노사이클릭기동 유도전동기에서 임의의 속도에서의 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스를 평형운전조건에서 직접적으로 구하는 과정에서 복소수를 실수부와 허수부로 분해하는 등의 계산이 복잡해진다.

본 연구에서는 전원이 접속된 상에 대하여 앞선 상에 커패시터와 뒤진 상에 인덕터가 접속된 모노사이클릭기동 유도전동기를 대상으로 하여 임의의 속도에서 각 소자의 리액턴스를 평형운전조건적인 전압불평형률의 식을 이용하여 대수계산 없이 계산할 수 있는 방법을 제안하고 기존의 방법과 비교하여 방법의 적용성을 검토하고자 한다. 또한, 기동과 정격속도에서의 평형운전조건에 의해 구한 각 소자의 리액턴스를 사용하여 이 전동기의 운전특성을 3상 평형운전시의 특성과 비교하여 분석한다.

2. 해석이론

2.1 모노사이클릭기동 유도전동기의 일반식

단상전원에 의하여 운전되는 3상 유도전동기의 전원이 접속되지 않은 나머지 두 쌍의 단자에 상변환기로 수동회로 소자를 접속한 전동기를 모노사이클릭기동 유도전동기라 한다. 두개의 소자 중 저항소자는 전력손실 때문에 거의 사용하지 않고 리액턴스 소자로 커패시터와 인덕터를 사용하고 있다. 그림 1은 전원이 접속된 상에 대하여 앞선 상에는 커패시터를, 뒤진 상에는 인덕터가 상변환기로 접속된 델타결

[†] 교신저자, 正會員 : 濟州大學校 電氣工學科 博士課程
E-mail: hl4hmx@lycos.co.kr

^{*} 正會員 : 濟州大學校 電氣電子工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2008年 1月 18日
最終完了 : 2008年 2月 4日

선의 3상 유도전동기의 고정자 결선도이다.

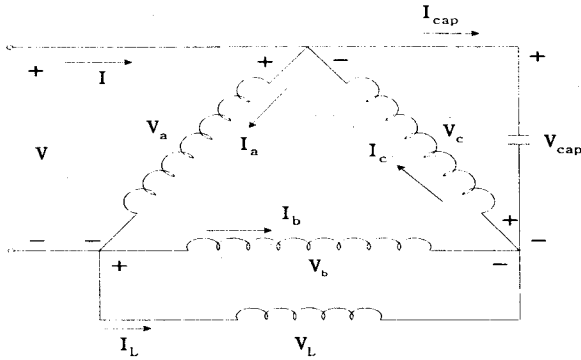


그림 1 모노사이클릭기동 유도전동기의 고정자 접속

Fig. 1 Stator connection of monocyclic start induction motor

이 그림에서 V 는 단상 공급전압, I 는 입력전류, V_a, V_b, V_c 는 상전압, I_a, I_b, I_c 는 상전류 그리고 V_{cap}, V_L 과 I_{cap}, I_L 은 각각 커패시터와 인덕터의 전압과 전류이다.

모노사이클릭기동 유도전동기에 단상전원이 공급될 때 특정속도에서의 상변환기를 제외하고 상전압과 상전류는 불평형이 되므로 이들을 대칭성분으로 분해하여 해석하기 위한 전력불변 대칭성분 변환행렬은

$$[C] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

이고, 여기서 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.

3상 변수 f_a, f_b, f_c 와 대칭성분 f_z, f_p, f_n 사이에는

$$[f]_{abc} = [C][f]_{zpn} \quad (2)$$

의 관계가 있고, 여기서

$$[f]_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^t \quad (3)$$

$$[f]_{zpn} = [f_z \ f_p \ f_n]^t \quad (4)$$

이고, f_z, f_p, f_n 은 각각 영상분, 정상분 그리고 역상분이다. 그림의 회로에서 영상분 전압이 0이므로 영상분 성분의 계산은 필요 없다.

이 회로를 해석하기 위하여 회로 방정식을 세우면

$$V = V_a \quad (5)$$

$$V_{cap} = -V_c = Z_c I_{cap} \quad (6)$$

$$V_L = V_b = Z_L I_L \quad (7)$$

$$I_{cap} + I_L = I_c - I_b \quad (8)$$

$$I = I_{cap} + I_a - I_c \quad (9)$$

이 되고, 이 식들을 대칭분 전압식으로 변환하기 위하여

$$V_p = Z_p I_p = (R_p + jX_p) I_p \quad (10)$$

$$V_n = Z_n I_n = (R_n + jX_n) I_n \quad (11)$$

의 관계를 사용하고, 식 (5)와 식 (8)을 대칭성분으로 변환하여 V_p 와 V_n 을 구하면

$$V_p = \frac{\sqrt{3} V \left(\frac{a-a^2}{Z_n} - \frac{a^2}{Z_{cap}} + \frac{a}{Z_L} \right)}{(a-a^2) \left(\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_n} + \frac{1}{Z_{cap}} + \frac{1}{Z_L} \right)} \quad (12)$$

$$V_n = \frac{\sqrt{3} V \left(\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{Z_{cap}} - \frac{a^2}{Z_L} \right)}{(a-a^2) \left(\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_n} + \frac{1}{Z_{cap}} + \frac{1}{Z_L} \right)} \quad (13)$$

이 되므로, 이 식을 사용하여 식 (10)과 식 (11)에 의하여 대칭분 전류를 구하고 전동기의 제반 운전특성을 구할 수 있다.

2.2 상변환기의 리액턴스 결정

IEC 규정에 의한 전압불평형률 (VUF)[10]은 식 (12)와 (13)에 의하여

$$VUF = |V_n| / |V_p| \quad (14)$$

으로 주어진다.

따라서 전동기를 평형상태로 운전하기 위해서는 $VUF=0$ 이 되어야 한다. 즉, 이것은 $V_n=0$ 이 되어야 함을 의미하므로 식 (13)으로부터

$$\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{Z_{cap}} - \frac{a^2}{Z_L} = 0 \quad (15)$$

이 되고, 이 식에서 $Z_{cap} = -jX_c, Z_L = jX_L$ 을 대입하여 풀면

$$X_c = \frac{R_p^2 + X_p^2}{\sqrt{3} R_p + X_p} \quad (16)$$

$$X_L = \frac{R_p^2 + X_p^2}{\sqrt{3} R_p - X_p} \quad (17)$$

이 된다. 그러나 이 방법은 각 슬립에서 정상분 임피던스의 저항과 리액턴스 성분을 계산하기 위해서 대수계산이 필요하게 된다.

본 연구에서는 이러한 번거로움을 줄이기 위하여 임의의 슬립에서 식 (15)를 만족하는 X_c 와 X_L 을 다음과 같이 구한다. 식 (15)는 복소수 함수로 미지수로 X_c 와 X_L 을 포함하므로 실수부와 허수부로 분리하여 각각 0으로 놓은 두 식을

연립방정식으로 구성하면

$$Re\left(\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L}\right) = 0 \quad (18)$$

$$Im\left(\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L}\right) = 0 \quad (19)$$

이 된다. 이 두 식을 적절한 초기 추측값을 사용하여 쉽게 X_c 와 X_L 을 구할 수 있다.

다른 방법으로 임의의 슬립에서 식 (15)의 크기가 0이 되는 조건식과 이 식이 X_c 에 대하여 최소가 되는 식을 연립방정식으로 구성하면

$$\left|\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L}\right| = 0 \quad (20)$$

$$\frac{d}{dX_c} \left|\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L}\right| = 0 \quad (21)$$

이 되므로 이 식을 적절한 초기 추측값을 사용하여 대수 계산 없이 X_c 와 X_L 을 구할 수 있다.

3. 해석결과 및 분석

운전특성 분석에 사용한 전동기는 Lab Volt사의 정격전압 208/120[V], 전류 1.3[A], 출력 175[W], 주파수 60[Hz], 회전수 1500[rpm] 인 4극의 3상 권선형 유도전동기이다. 이 전동기의 IEEE 권장 등가회로[11] 정수는 고정자 권선저항 $r_s=12.5[\Omega]$, 고정자측으로 환산한 회전자 권선저항 $r_r=14.9[\Omega]$, 고정자과 고정자측으로 환산한 회전자 리액턴스 $x_s=x_r=8.8[\Omega]$, 그리고 자화리액턴스 $x_m=180[\Omega]$ 이다.

표 1 기존의 방법과 제안된 방법에 의해 계산된 X_c 와 X_L 의 비교

Table 1 Comparison of both X_c and X_L computed by known and proposed method

Method	Slip X		s=1 (at starting)		s=0.1667 (at rated speed)	
	X_c	X_L	X_c	X_L	X_c	X_L
Known (by eq.(16) & (17))	15.9303	37.7009	46.3485	97.5648		
Proposed (by eq.(18) & (19))	15.9303	37.7009	46.3485	97.5648		
Proposed (by eq.(20) & (21))	15.9303	37.7009	46.3483	97.5644		

본 논문에서 제안된 평형운전을 위한 상변환기의 리액턴스의 결정방법의 타당성을 검토하기 위하여 기존의 방법인 식 (16)과 (17)에 의한 결과와 제안된 방법인 식(18)과 (19) 그리고 식 (20)과 (21)에 의하여 기동과 정격속도에서 계산

한 결과를 표 1에 보였다.

이 계산에서 제안된 방법을 적용할 때 두 방법 모두 초기 추측치로 $X_c=X_L=10[\Omega]$ 으로 하여 계산하였다. 이 결과에서 보듯이 기존의 방법과 제안된 방법에 의한 결과가 잘 일치하고 있으므로 모노사이클릭기동 유도전동기의 상변환기의 리액턴스의 계산이 용이해 짐을 알 수 있다.

이상의 기동과 정격속도에서 구한 X_c 와 X_L 을 사용하여 모노사이클릭기동 유도전동기의 속도변화에 따른 운전특성을 계산하여 그림 2에서 그림 7까지 보인다. 그림의 특성을 나타내는 문자 중 끝의 b는 3상 평형운전을, s와 r은 각각 기동시와 정격속도시의 X_c 와 X_L 을 사용하였을 때를 표시한 것이다.

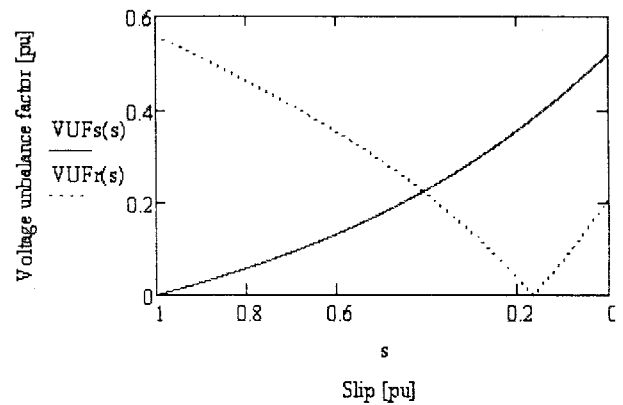


그림 2 전압불평형률의 변화
Fig. 2 Variation of voltage unbalance factor

그림 2에서 보듯이 전압불평형률은 최대 0.559[pu]에서 0[pu]까지 변화하고 있으며 슬립 0.4 근처에서 VUFs와 VUFr이 같은 값을 가지고 있으므로 기동용과 정격운전용 X_c 와 X_L 을 사용할 경우 이 슬립에서 절환하므로써 비교적 낮은 VUF로 운전이 가능함을 알 수 있다.

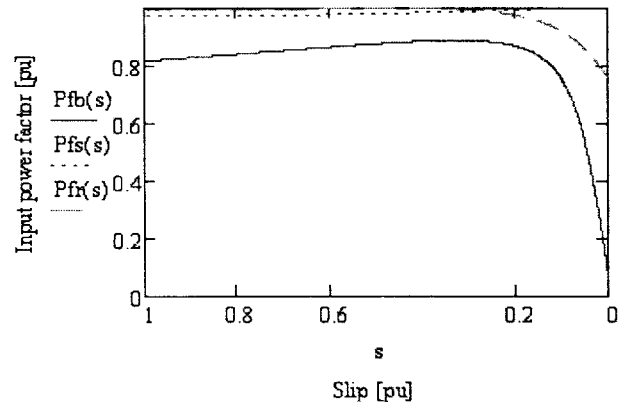


그림 3 입력역률의 변화
Fig. 3 Variation of input power factor

입력역률은 전체속도 범위에서 pf_b 보다 pf_s 와 pf_r 가 양호함을 그림 3에서 알 수 있으며 정격속도에서 $pf_b=0.851$ [pu], $pf_s=0.996$ [pu], $pf_r=0.964$ [pu]로 용량성 리액턴스가 작을수록, 커패시턴스가 클수록 좋아짐을 알 수 있다.

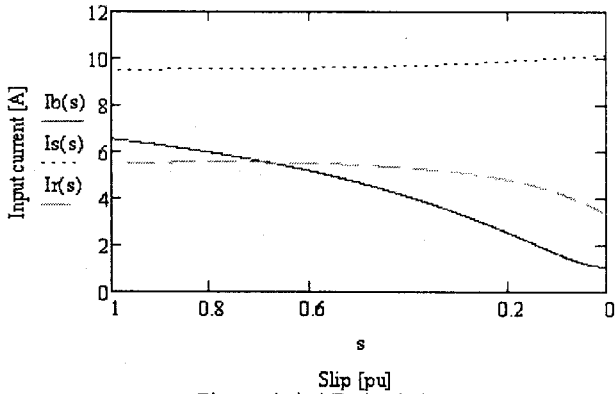
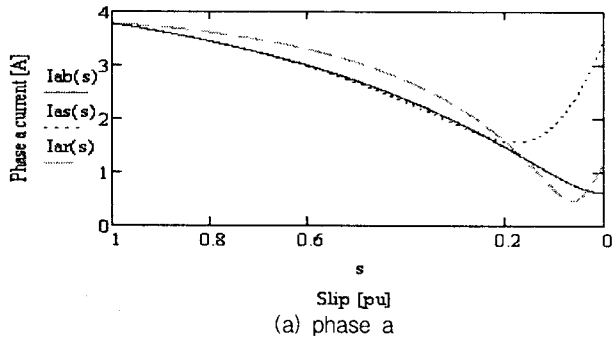
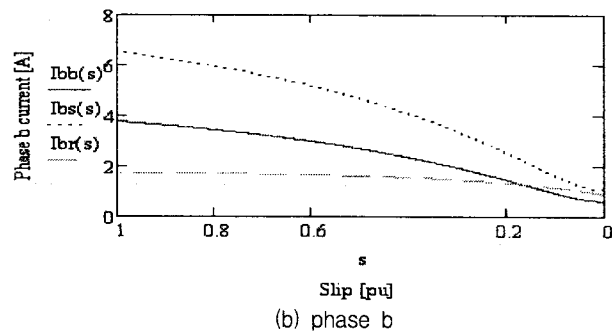


그림 4 입력전류의 변화
Fig. 4 Variation of input current

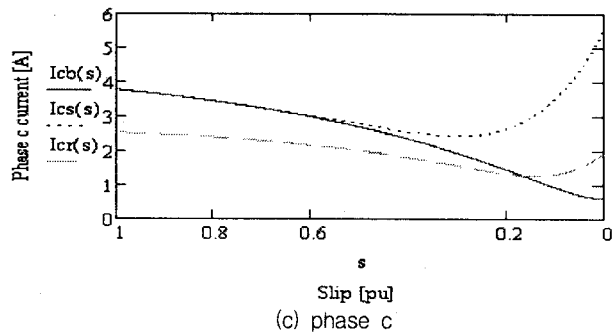
입력전류는 그림 4에서 보듯이 기동시 $I_s=9.532[A]$ 로 가장 크고 $I_b=6.550[A]$, $I_r=5.493[A]$ 이며 정격속도에서 $I_b=2.243[A]$, $I_s=9.925[A]$, $I_r=4.650[A]$ 로 I_r 이 I_s 보다 작음을 알 수 있다.



(a) phase a



(b) phase b



(c) phase c

그림 5 상전류의 변화
Fig. 5 Variation of phase current

그림 5는 속도에 따른 상전류의 변화를 보이고 있다. 그림 5 (a)에서 보듯이 a상전류는 기동에서 정격속도까지 거의 같은 변화를 하고 있으며 정격속도에서 $I_{ab}=1.295[A]$, $I_{as}=1.575[A]$, $I_{ar}=1.295[A]$ 로 I_{as} 가 흐르는 경우 I_{ar} 에 비하여 동손이 48[%] 증가할 수 있음을 알 수 있다. 그림 5 (b)는 b상전류의 변화로 기동시 $I_{bb}=3.782[A]$, $I_{bs}=6.550[A]$, $I_{br}=1.717[A]$ 로 I_{bs} 가 가장 크며 정격속도에서 $I_{bb}=1.295[A]$, $I_{bs}=2.243[A]$, $I_{br}=1.295[A]$ 로 I_{bs} 가 흐르는 경우 I_{br} 에 비하여 동손이 300[%] 증가한다. 그림 5 (c)는 c상 전류로 기동시 $I_{cb}=3.782[A]$, $I_{cs}=3.782[A]$, $I_{cr}=2.532[A]$ 로 I_{cr} 이 비교적 작고 정격속도에서 $I_{cb}=1.295[A]$, $I_{cs}=2.845[A]$, $I_{cr}=1.295[A]$ 로 I_{cs} 가 흐르는 경우 I_{cr} 에 비하여 동손이 483[%] 증가한다. 이상에서 알 수 있듯이 기동용과 정격운전용 X_C 와 X_L 를 사용할 경우 권선의 동손에 의한 과열을 줄여 운전할 수 있음을 알 수 있다.

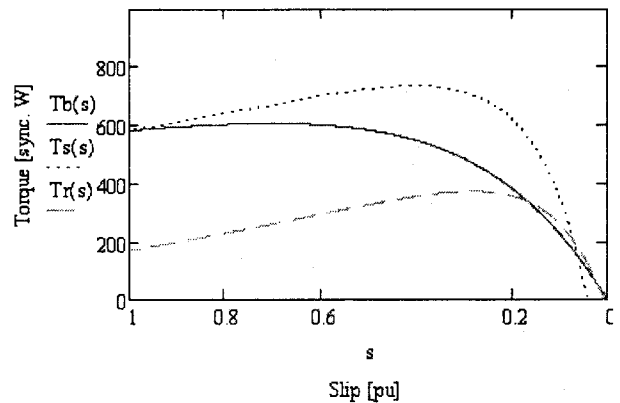


그림 6 토크-속도 특성
Fig. 6 Torque-speed characteristics

토크-속도특성을 표시한 그림 6에서 보듯이 기동시 $T_b=577.4[Sync.W]$, $T_s=577.4[Sync.W]$, $T_r=166.8[Sync.W]$ 로 T_b 와 T_s 가 같으며 정격속도에서 $T_b=334.0[Sync.W]$, $T_s=554.4[Sync.W]$, $T_r=334.0[Sync.W]$ 로 T_b 와 T_r 이 같다. 이것은 각 속도에 따라 평형운전 조건에 의한 X_C 와 X_L 를 구하여 연속적으로 가변시킴으로써 3상 평형운전시와 같은 토크-속도특성이 얻어질 수 있음을 알 수 있었다.

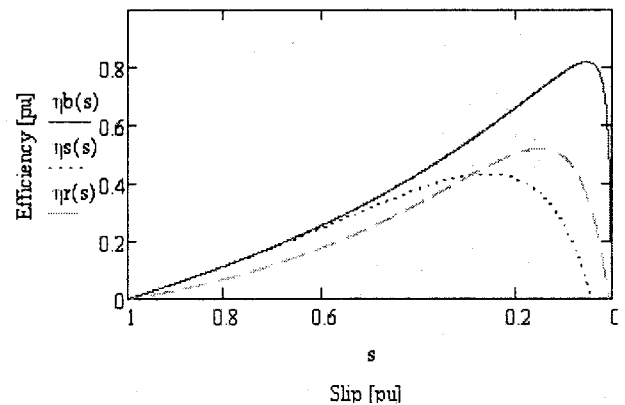


그림 7 효율특성
Fig. 7 Efficiency characteristics

그림 7은 효율특성으로 정격속도에서 $n_{s1}=0.701[\text{pu}]$, $n_{s2}=0.390[\text{pu}]$, $n_{s3}=0.517[\text{pu}]$ 로 3상 평형운전시보다 모두 효율이 낮고 n_{s1} 가 n_{s2} 보다 더 낮음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 보듯이 속도변화에 따라 각 속도에서 전압불평형률이 0이 되는 조건을 이용하여 X_C 와 X_L 을 구하여 이들을 사용하면 3상 평형운전과 같은 토크-속도특성이 얻어지고 입력역률도 좋아지지만 입력전류가 증가하고 효율은 악화됨을 알 수 있다.

따라서 몇 개의 속도에서 평형운전조건을 이용하여 구한 X_C 와 X_L 을 사용하면 제한된 전압불평형률 범위에서 효율은 나빠지지만 운전이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

단상전원에 의하여 운전되는 전원이 접속된 상에 대하여 앞선 상에는 커패시터를, 뒤진 상에는 인덕터가 상변환기로 접속된 모노사이클릭기동 유도전동기의 상변환기 리액턴스의 결정방법을 제안하였다. 이 방법은 평형운전조건식인 전압불평형률의 식을 이용하여 결정할 수 있는 방법으로 기존의 방법에 대하여 대수계산 없이 용이하게 결정할 수 있는 방법이다.

방법의 적용성을 검토하기 위하여 기동과 정격속도에서의 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스를 구하여 기존의 방법의 결과와 비교하여 확인한 결과 두 방법이 잘 일치하였다.

또한, 기동과 정격속도에서의 리액턴스를 사용하여 운전특성을 계산하고 3상 평형운전시의 특성과 비교한 결과, 각 속도에서 평형운전조건을 이용하여 리액턴스를 구하고 이들을 연속적으로 가변시킴으로써 3상평형운전과 같은 토크-속도특성이 얻어질 수 있고, 입력전류가 증가하며 전류증가로 인한 동손의 증가로 효율이 악화되지만 입력역률은 좋아짐을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J. E. Brawn and C. S. Jha, "The starting of a 3-phase induction motor connected to a single-phase supply system", IEE proc., 106, pt. A, No. 26, pp. 183-190, 1959.
 [2] S. S. Murthy, G. J. Berg, B. Singh, C. S. Jha, and B.P. Singh, "Transient analysis of a three phase induction motor with single phase supply", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-102, No. 1, pp. 28-37, 1983.
 [3] S. E. M. Oliveira, "Operation of three-phase induction motors connected to one-phase supply", IEEE Trans. EC, Vol. 5, No.4, pp. 713-718, 1990.
 [4] S. J. Al-Isawi and A. A. Adem, "Dynamic and Transient behaviour of a three phase induction motor supplied by one phase inverter", Universities Power Engineering conference, UPEC 2004, 39th International, pp. 533-537, 2004.
 [5] 김도진, 강상수, 좌종근, "스타인메츠결선 유도전동기에 대한 전선전류 분석", 전기학회 제주지부 합동학술발표회, 학술발표회 논문집, 제22집, pp. 54-57, 2007.

[6] T. Irida, "On the optimal control for monocyclic starting of three phase induction motors", JIEE, Vol. 84-12, No. 915, pp. 78-85, 1964.
 [7] T. Morishita, H. Watanabe, and S. Okuda, "Analysis of monocyclic motors with asymmetrical 3-phase stator windings", JIEE, Vol. 96, No. 4, pp. 25-32, 1976.
 [8] M. Iwahashi, T. Morishita, H. Watanabe and S. Okuda, "Performance of 3-phase induction motor connected to a single-phase supply controlled by thyristor pair", JIEE, Vol. 100, No. 5, pp. 41-48, 1980.
 [9] J. H. H. Alwash, "Predicting performance of three-phase induction motors connected to single-phase supplies", IEE proc., Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 4, pp. 339-344, 1996.
 [10] P. G. Kini, R. C. Basal, and R. S. Aithal, "A Novel Approach Toward Interpretation and Application of Voltage Unbalance Factor", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 4, pp. 2315-2322, 2007.
 [11] P. C. Sen, "Principles of Electronic Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons, p. 227, 1997.

저 자 소 개



김도진 (金度進)

1973년 4월 9일생. 1999년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004~현재 동 대학원 박사과정

E-mail : hl4hmx@lycos.co.kr



좌종근 (左宗根)

1970년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1984 Purdue Univ. visiting scholar. 1979~현재 제주대학교 전기전자공학부 교수

Tel : (064) 754-3671

Fax : (064) 756-5281

E-mail : keunjc@cheju.ac.kr