

碩士學位論文

單相 非正弦波 電壓이 印加된
3相 誘導電動機의 解析

The logo of Jeju National University is a large, stylized 'J' shape. The left vertical stroke of the 'J' is composed of three curved, flame-like shapes in blue, green, and grey. The right vertical stroke is a solid purple. At the bottom of the 'J', there is a smaller logo featuring a book icon and the text 'JEJU 1952'. The entire logo is set against a background of a large, faint watermark of the university's name in English ('JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952') and Korean ('제주대학교').

濟州大學校 大學院

電氣工學專攻

具昌浩

2009年 12月

單相 非正弦波 電壓이 印加된 3相 誘導電動機의 解析

指導教授 左 宗 根

具 昌 浩

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 12月

具昌浩의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 李 開 明 

委 員 金 一 煥 

委 員 左 宗 根 

濟州大學校 大學院

2009年 12月

**Analysis of Three-Phase Induction Motor
Supplied by Single-Phase
Nonsinusoidal Voltage**

Chang-Ho Goo

(Supervised by Professor Chong-Keun Jwa)

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING**

**FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY**

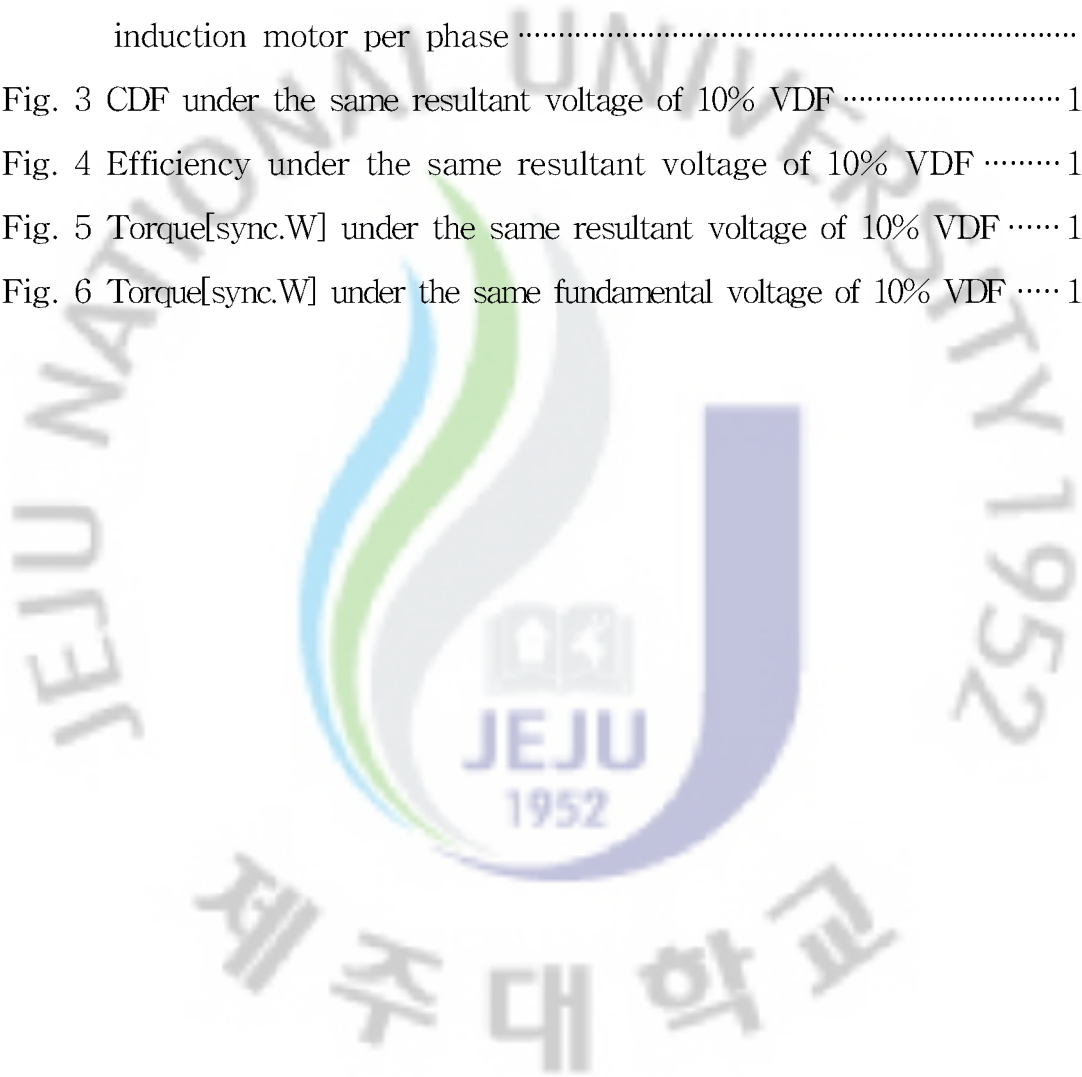
2009. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	ii
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
II. 해석이론	2
1. 회로구성과 회로방정식	2
2. 전압 왜형률과 전류 왜형률	4
3. 등가회로와 해석	5
III. 결과 및 검토	8
IV. 결 론	19
참 고 문 헌	20
감사의 글	22

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Steinmatz connection induction motor supplied by single-phase nonsinusoidal voltage	2
Fig. 2 The k th order harmonic equivalent circuit of three-phase induction motor per phase	6
Fig. 3 CDF under the same resultant voltage of 10% VDF	11
Fig. 4 Efficiency under the same resultant voltage of 10% VDF	13
Fig. 5 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 10% VDF	15
Fig. 6 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 10% VDF	17



LIST OF TABLES

Table 1 CDF under the same resultant voltage of 5%VDF	9
Table 2 CDF under the same resultant voltage of 10%VDF	10
Table 3 CDF under the same resultant voltage of 15%VDF	10
Table 4 Efficiency under the same resultant voltage of 5% VDF	12
Table 5 Efficiency under the same resultant voltage of 10% VDF	12
Table 6 Efficiency under the same resultant voltage of 15% VDF	13
Table 7 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 5% VDF	14
Table 8 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 10% VDF	14
Table 9 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 15% VDF	15
Table 10 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 5% VDF	16
Table 11 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 10% VDF	16
Table 12 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 15% VDF	17

SUMMARY

This paper presents the performance analysis of the Steinmetz connection induction motor when the nonsinusoidal voltages of the various voltage distortion factors(VDFs) are supplied. The nonsinusoidal voltages of the fundamental combined with the second to ninth order harmonic are applied, and the T-type equivalent circuit taken into account the no load losses is used to analyze. The analysis is based on the symmetrical component theory and the principle of superposition

The analyzed results are as follows;

- 1) When the VDFs has same values at different resultant voltages, the CDFs also have same values.
- 2) When the CDFs at one VDF is known, the CDFs at the other VDF can be obtained using the ratio of two VDFs.
- 3) The higher the harmonic order of the resultant voltage is, the lower the CDF, and the more the load, the lower the CDF.
- 4) The higher the harmonic order of the resultant voltage is, slightly the higher the efficiency, and the more the load, the lower the efficiency. The higher the voltage distortion factor is, slightly the lower the efficiency.
- 5) The higher the resultant voltage is, the higher the torque, and the higher the harmonic order of the resultant voltage, the higher the torque.

I. 서론

전력 계통에서 발생하는 고조파의 원인으로는 아크로 등과 같은 비선형 부하, 인버터 등의 정지 전력변환장치, 그리고 변압기 등의 가포화 자기 재료의 사용 등에 의한 것으로 보고 있다. 계통에 고조파가 발생하면 부하 요소인 전동기에 비정현파의 전압이 인가되어 이에 따른 영향이 다양하게 나타난다[1].

이에 따라, 3상 유도전동기의 고조파 전원에 의한 운전 성능 분석은 Doggett 와 Queer[2]를 위시하여 Jain[3], Klingshirn 과 Jordan[4], 그리고 Vamvakari 등 [5]에 의하여 계속적으로 연구가 수행되고 있다.

또한, 3상 유도전동기를 단상 운전하기 위하여 상변환기로 커패시터를 전원상에 대하여 앞선 상의 단자에 접속하여 사용하는 스타인메츠 결선이 고안 되었다. 이 전동기에 대한 연구로 Brown 과 Jha[6]는 기동시의 특성을 평형 3상 조건하에서 정지시 전동기의 상당 어드미턴스와 상변환기의 어드미턴스 비로 정의한 매개변수와 이들 어드미턴스 각의 차로 정의한 매개변수로 분석하는 방법을 제시하고, Daniels 와 Pelly[7]는 기동 특성을 궤적도에 의하여 도식적으로 구하고 특히 최소 불평형에 대한 어드미턴스로 몇 개의 최적조건을 얻고 있다. Murthy 등[8]은 전동기의 과도 특성을 순시치 대칭좌표법을 이용하여 해석하고, Oliveira[9]는 소용량의 스타인메츠결선 전동기의 정상상태 운전 특성을 해석하고 있다. Isawi 와 Adem[10]는 단상 인버터에 의해 운전할 때의 과도 특성을, 그리고 김과 좌 [11]는 손실분석에 대하여 보고하였다. 그러나 이 전동기들의 연구에서는 비정현파 전압이 인가된 정상상태의 제반 특성 분석은 되어 있지 않다.

따라서, 본 연구에서는 스타인메츠 결선 유도 전동기에 전압 왜형률이 다른 비정현파 전압이 인가되었을 때 특성을 중첩의 원리와 대칭성분에 의하여 해석하여 분석하고자 한다. 해석을 위하여 무부하 손실이 고려된 T형 등가회로를 사용하였고, 그리고 합성전압은 같지만 전압 왜형률이 다른 경우, 기본파 전압은 같지만 전압 왜형률이 다른 경우에 대하여 기본파와 제 k 차 고조파의 합성전압이 인가될 때 정격 부하와 그 전후에서의 특성의 변화를 시뮬레이션 하여 검토한다.

II. 해석이론

1. 회로구성과 회로방정식

단상 비정현파 전압이 인가된 델타결선 3상 유도 전동기에 전원상에 대하여 앞선상의 권선단자에 한 개의 커패시터 상변환기가 접속된 스타인메츠 결선의 회로를 Fig. 1에 보인다.

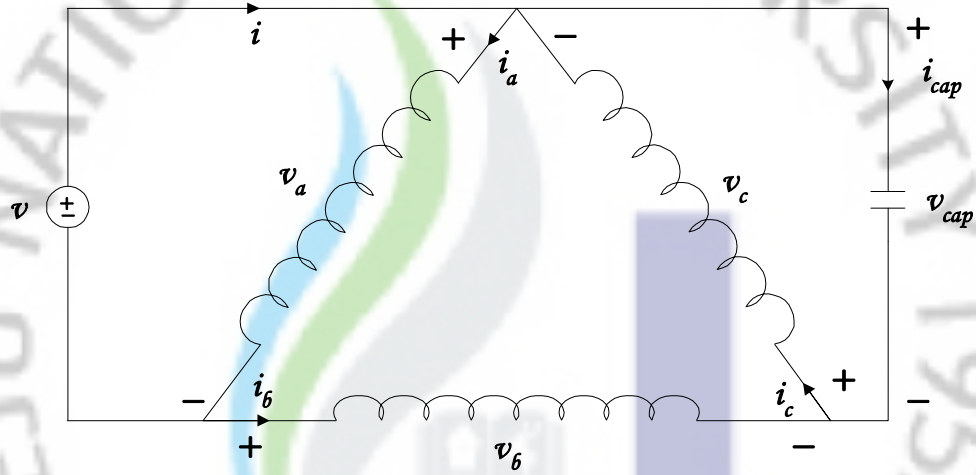


Fig. 1 Steinmetz connection induction motor supplied by single-phase nonsinusoidal voltage

이 전동기에 인가된 주기적인 비정현파 전압이 인가될 때, 전압은 Fourier 분석에 의하여 기본파와 기본파의 정수배 주파수의 고조파의 합으로 나타낼 수 있다. 그러므로 비정현파 인가전압 v 는 식 (1)로 표현되고, 이 전압이 인가되면 전동기 단자전류 i 는 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$v = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2} V_k \sin(k\omega t + \theta_k) \quad (1)$$

$$i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{k=2}^{\infty} \sqrt{2} I_k \sin(k\omega t + \phi_k) \quad (2)$$

Fig. 1의 회로를 해석하기 위한 전압, 전류 평형식은

$$v = v_a \quad (3)$$

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (4)$$

$$v_{cap} = -v_c = \frac{1}{C} \int i_{cap} dt \quad (5)$$

$$i_{cap} = i_c - i_b \quad (6)$$

$$i = i_a - i_b \quad (7)$$

이 된다.

본 논문에서는 비정현파 인가전압이 기본파와 제 k 차 고조파의 합으로 된 전압의 왜형을 변화에 따른 정상상태에서의 특성을 해석하고자 하므로 식(1)과 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$v = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sqrt{2} V_k \sin(k\omega t + \theta_k) \quad (8)$$

$$i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sqrt{2} I_k \sin(k\omega t + \phi_k) \quad (9)$$

그러므로 식(8)의 의미는 기본파와 제 k 차 고조파 전원이 직렬로 연결되어 전동기에 인가되는 것으로 중첩의 원리에 의하여 이 전동기를 해석할 때 기본파 전압이 인가된 전동기와 제 k 차 고조파 전압이 인가된 전동기가 같은 축에 연결되어 운전되는 것으로 하여 제반 특성들을 구할 수 있다.

2. 전압 왜형률과 전류 왜형률

비정현파 전압, 전류의 고조파에 의한 파형의 왜형 정도를 나타내는 왜형률은 다음과 같이 정의된다.

IEEE-519에 의한 전전압 고조파 왜형률(total voltage harmonics distortion factor : THD_v)은 다음과 같다.

$$THD_v = \left(\frac{\text{모든 고조파 전압 크기의 제곱합}}{\text{기본파 전압 크기의 제곱}} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 = \left(\frac{\sum_{k=2}^{\infty} |V_k|^2}{|V_1|^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 \quad (10)$$

그리고 제 k 차 고조파에 의한 전압 왜형의 정도는 전압 왜형률(voltage distortion factor : VDF)로 다음과 같다.

$$VDF = \left(\frac{\text{제 } k \text{차 고조파 전압 크기의 제곱}}{\text{기본파 전압 크기의 제곱}} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 = \left(\frac{|V_k|}{|V_1|} \right) \times 100 \quad (11)$$

이와 유사하게 제 k 차 고조파에 의한 전류 왜형의 정도를 전류 왜형률(current distortion factor : CDF)로 정의하면 다음과 같다.

$$CDF = \left(\frac{\text{제 } k \text{차 고조파 전류 크기의 제곱}}{\text{기본파 전류 크기의 제곱}} \right)^{\frac{1}{2}} \times 100 = \frac{|I_k|}{|I_1|} \times 100 \quad (12)$$

여기서, V_1 , I_1 과 V_k , I_k 는 각각 기본파 전압, 전류와 제 k 차 고조파 전압, 전류의 페이저이다.

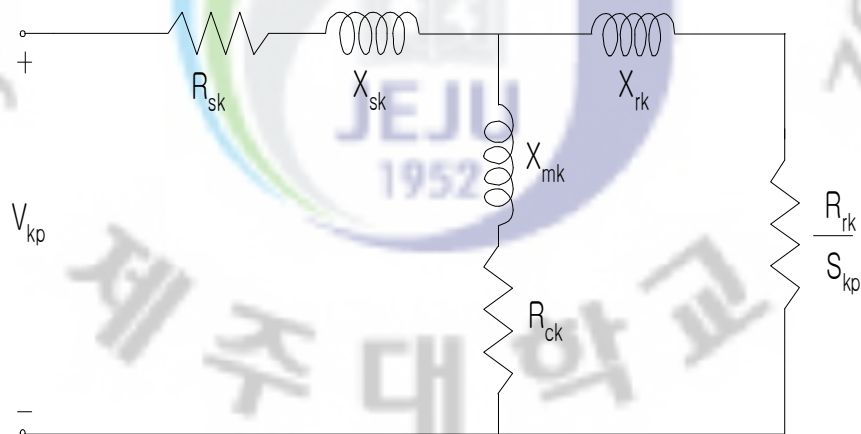
3. 등가회로와 해석

Fig. 1의 회로 구성에서 보듯이 대칭 3상 유도전동기, 전원, 그리고 커패시터 상변환기가 비대칭으로 연결되어 있으므로 대칭성분에 의한 해석이 필요하다. 비정현파 전압이 이 전동기에 인가되면 기본파 전동기와 제 k 차 고조파 전동기는 각각 정상분 전동기와 역상분 전동기가 같은 축에 연결된 것으로 볼 수 있다. 그러므로 해석을 위하여 각 전동기에 대한 등가회로가 필요하고 등가회로로서 무부하손실이 고려된 T형 등가회로를 사용한다.

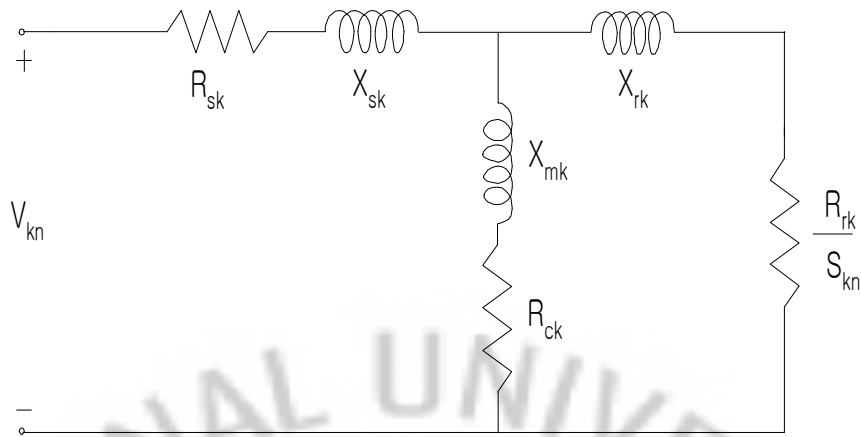
이 등가회로에서 다음과 같은 가정을 둔다.

- i) 기본파와 제 k 차 고조파의 전압파형은 정현파이다.
- ii) 모든 회로정수는 상수이고 포화의 영향은 고려하지 않는다.

이상과 같은 조건에서의 제 k 차 고조파 전압이 인가된 정상분, 역상분 등가회로는 Fig. 2와 같다.



a) positive sequence



b) negative sequence

Fig. 2 The k th order harmonic equivalent circuit of three-phase induction motor per phase

등가회로에서 S_{kp} 와 S_{kn} 은 각각 제 k 차 고조파 정상분과 역상분 전동기의 슬립으로 다음식과 같다.

$$S_{kp} = \frac{k - (1 - s)}{k} \quad (13)$$

$$S_{kn} = \frac{k + (1 - s)}{k} \quad (14)$$

여기서, s 는 기본파 정상분 전동기의 슬립이다.

식(3)과 식(5)를 제 k 차 고조파 전압, 전류 페이저로 하고 전력불변 변환행렬을 사용하여 대칭성분 전압을 구하면

$$V_{kp} = \frac{\sqrt{3} V_k \left(\frac{a^2}{a^2 - a} + \frac{Z_{kc}}{Z_{kn}} \right)}{1 + \frac{Z_{kc}}{Z_{kp}} + \frac{Z_{kc}}{Z_{kn}}} \quad (15)$$

$$V_{kn} = \frac{-\sqrt{3} V_k \left(\frac{a}{a^2 - a} - \frac{Z_{kc}}{Z_{kp}} \right)}{1 + \frac{Z_{kc}}{Z_{kp}} + \frac{Z_{kc}}{Z_{kn}}} \quad (16)$$

이 되고, 여기서 Z_{kp}, Z_{kn} , 그리고 Z_{kc} 는 각각 제 k 차 고조파 정상분, 역상분, 그리고 상변환기 임피던스이며 a 는 대칭분 연산자로 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.

대칭분 전류는

$$I_{kp} = \frac{V_{kp}}{Z_{kp}} \quad (17)$$

$$I_{kn} = \frac{V_{kn}}{Z_{kn}} \quad (18)$$

이 된다.

각 상 전압은 식(15)와 식(16)으로, 각 상 전류는 식(17)과 식(18)로 구할 수 있고, a 상과 b 상 전류의 차로 입력 전류를 구한다. 이후에 입력 복소전력, 역률, 2차전류, 2차입력, 출력, 그리고 효율 등을 위의 식들과 등가회로에 의하여 계산한다. 기본파 전압에 의한 제반 특성도 같은 과정과 방법으로 계산하여 각 고조파의 제반 특성값과 합성하여 분석한다.

Ⅲ. 결과 및 검토

본 논문에 사용한 전동기는 Lab Volt사의 정격전압 208/120V, 전류 1.3A, 출력 175W, 주파수 60Hz, 회전수 1500rpm인 4극의 3상 권선형 유도전동기이다. 전동기의 등가회로 정수는 고정자 권선저항과 리액턴스가 각각 $R_s=12.07\Omega$ 과 $X_s=10.17\Omega$ 이고, 고정자측으로 환산한 회전자 저항과 리액턴스는 각각 $R_r=14.82\Omega$ 과 $X_r=10.59\Omega$ 이며, 무부하손 저항과 자화리액턴스는 각각 $R_c=5.92\Omega$ 과 $X_m=142.56\Omega$ 이다.

이 전동기를 단상전원에 의하여 운전하기 위하여 전원이 인가된 상에 대해서 앞선 상에 커패시터 상변환기를 사용한 스타인메츠결선으로 한다. 커패시터의 커패시턴스는 최소 불평형률 조건에 의해서 기동시와 정격속도에서 각각 구한 $C_s=141.008\mu\text{F}$ 와 $C_r=48.794\mu\text{F}$ 를 전압 불평형률이 같아지는 슬립 $s=0.45$ 에서 교체하는 것으로 한다.

정격 부하와 그 전후에서 전동기 성능의 변화를 분석하기 위하여 전압 왜형률이 5%, 10%, 그리고 15%인 기본파와 제 k 차 고조파의 합성전압이 정격전압과 같은 전압이 인가될 때의 값을 Table 1, 2, 3에 각각 보인다.

이때 합성전압이 정격전압과 같고 전압 왜형률이 5%일때 기본파 전압과 제 k 차 고조파 전압은 정의 식에 의해서

$$(V_1^2 + V_k^2)^{\frac{1}{2}} = 120 \quad (19)$$

$$\frac{V_k}{V_1} \times 100 = 5 \quad (20)$$

인 두 식을 연립하여 구할 수 있다.

또한, 기본파 전압이 정격전압과 같고 전압 왜형률이 5%일때 V_1 과 V_k 는

$$V_1 = 120 \quad (21)$$

$$\frac{V_k}{V_1} \times 100 = 5 \quad (22)$$

으로 놓아 구할 수 있다.

Table 1, 2, 3은 합성전압이 같고 전압 왜형률이 각각 5%, 10%, 15%일 때의 전류 왜형률의 변화를 계산한 것이고, Fig. 3은 전압 왜형률 10%의 동일 합성전압에서 전 슬립범위에 대한 전류 왜형률의 변화를 보이고 있다. Fig에서 x축은 비정현파에 포함된 고조파 차수를 y축은 슬립(이하 동일)을 z축은 전류 왜형률(이하 특성치)을 나타낸다.

Table 1 CDF under the same resultant voltage of 5%VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	6.6133	7.1406	7.8570
v_1+v_3	6.3851	6.8780	7.5493
v_1+v_4	4.6339	4.9956	5.4877
v_1+v_5	3.6348	3.9192	4.3062
v_1+v_6	3.0000	3.2349	3.5546
v_1+v_7	2.5579	2.7583	3.0309
v_1+v_8	2.2318	2.4058	2.6436
v_1+v_9	1.9789	2.1340	2.3450

Table 2 CDF under the same resultant voltage of 10%VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	13.2265	14.2812	15.7140
v_1+v_3	12.7701	13.7559	15.0986
v_1+v_4	9.2677	9.9911	10.9754
v_1+v_5	7.2695	7.8384	8.6124
v_1+v_6	5.9999	6.4699	7.1091
v_1+v_7	5.1157	5.5165	6.0617
v_1+v_8	44.4619	4.8116	5.2872
v_1+v_9	3.9579	4.2680	4.6899

Table 3 CDF under the same resultant voltage of 15%VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	19.8399	21.4220	23.5711
v_1+v_3	19.1552	20.6380	22.6480
v_1+v_4	13.9016	14.9867	16.4632
v_1+v_5	10.9044	11.7577	12.9186
v_1+v_6	9.0000	9.7049	10.6637
v_1+v_7	7.6736	8.2748	9.0926
v_1+v_8	6.6929	7.2174	7.9308
v_1+v_9	5.9368	6.4021	7.0349

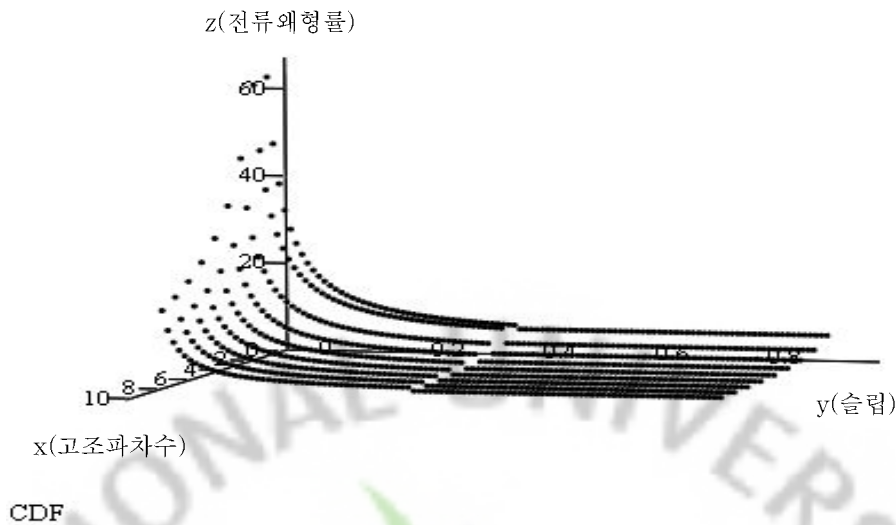


Fig. 3 CDF under the same resultant voltage of 10% VDF

Table과 Fig에서 보듯이 기본파전압에 합성된 고조파전압의 차수가 높을수록 전류 왜형률이 작아지고 있으며, 정격속도(부하)로 운전할 때 보다 낮은 속도(과부하)로 운전할 때는 전류 왜형률이 작고, 높은 속도(경부하)로 운전할 때는 커지고 있음을 알 수 있다.

그리고, 기본파 전압이 정격전압과 같고 전압 왜형률이 5%, 10%, 그리고 15% 때의 전류 왜형률 들을 Table 1, 2, 3과 같은 항으로 계산한 결과, 동일한 값들이 얻어지고 있음을 확인하였다. 이것은 전동기가 선형성을 갖는다고 가정하였기 때문에 같은 전압 왜형률을 갖는 전압이 인가되었을 때 같은 전류 왜형률이 된다고 볼 수 있다.

Table들에서 보듯이 한 전압 왜형률에서의 전류 왜형률을 알면 다른 전압 왜형률에서의 전류 왜형률을 다음과 같이 쉽게 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$10\% \text{ VDF에서의 CDF} = 2 \times 5\% \text{ VDF에서의 CDF}$$

$$15\% \text{ VDF에서의 CDF} = 3 \times 5\% \text{ VDF에서의 CDF}$$

이와 같이 동일 합성전압과 동일 기본파전압의 지정된 전압 왜형률 아래서 같은 특성을 가지는 것은 Table 4, 5, 6과 Fig. 4에 보인 효율이다.

Table 4 Efficiency under the same resultant voltage of 5% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	0.5872	0.6263	0.6627
v_1+v_3	0.5873	0.6265	0.6629
v_1+v_4	0.5877	0.6270	0.6635
v_1+v_5	0.5879	0.6272	0.6637
v_1+v_6	0.5880	0.6273	0.6638
v_1+v_7	0.5881	0.6274	0.6639
v_1+v_8	0.5881	0.6274	0.6639
v_1+v_9	0.5881	0.6274	0.6640

Table 5 Efficiency under the same resultant voltage of 10% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	0.5841	0.6228	0.6585
v_1+v_3	0.5846	0.6234	0.6594
v_1+v_4	0.5863	0.6254	0.6616
v_1+v_5	0.5871	0.6262	0.6626
v_1+v_6	0.5874	0.6266	0.6630
v_1+v_7	0.5876	0.6269	0.6633
v_1+v_8	0.5878	0.6270	0.6635
v_1+v_9	0.5879	0.6271	0.6636

Table 6 Efficiency under the same resultant voltage of 15% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	0.5791	0.6170	0.6518
v_1+v_3	0.5802	0.6184	0.6536
v_1+v_4	0.5840	0.6228	0.6586
v_1+v_5	0.5856	0.6246	0.6607
v_1+v_6	0.5864	0.6255	0.6618
v_1+v_7	0.5869	0.6261	0.6624
v_1+v_8	0.5872	0.6264	0.6628
v_1+v_9	0.5874	0.6266	0.6631

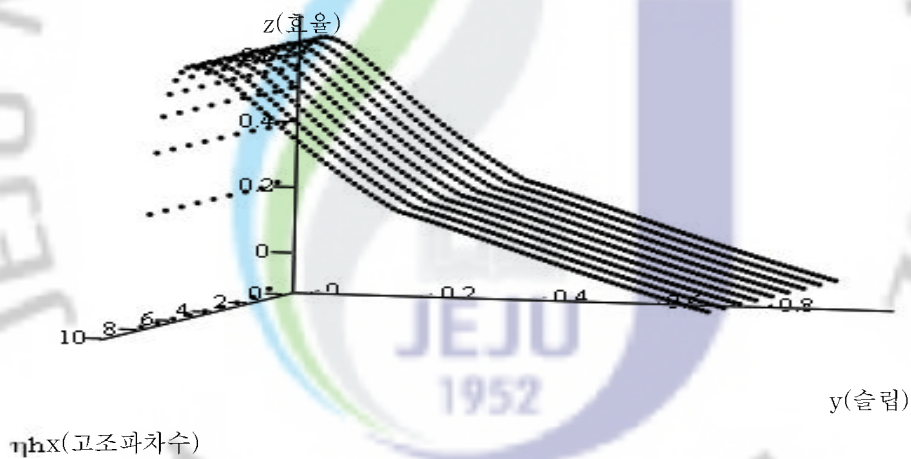


Fig. 4 Efficiency under the same resultant voltage of 10% VDF

Table과 Fig에서 보듯이 효율은 기본파 전압에 합성된 고조파 전압의 차수가 높을수록 근소하지만 높아지고 있으며 정격속도 보다 낮은 속도로 운전할 때는 낮고, 높은 속도로 운전할 때는 높음을 알 수 있다. 또한, 전압 왜형률이 커질수록 효율이 근소하게 낮아지고 있다.

Table 7, 8, 9와 Fig. 5, 그리고 Table 10, 11, 12와 Fig. 6은 각각 지정된 전압 왜형률 아래서 동일 합성전압과 동일 기본파 전압이 인가된 경우의 토크 특성이다.

Table 7 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 5% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	282.4384	272.9706	257.0633
v_1+v_3	281.9401	272.4710	256.5624
v_1+v_4	281.7886	272.3184	256.4087
v_1+v_5	281.7584	272.2877	256.3774
v_1+v_6	281.7484	272.2774	256.3669
v_1+v_7	281.7440	272.2729	256.3623
v_1+v_8	281.7418	272.2706	256.3599
v_1+v_9	281.7405	272.2693	256.3586

Table 8 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 10% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	282.4276	273.0408	257.2619
v_1+v_3	280.4494	271.0572	255.2733
v_1+v_4	279.8479	270.4512	254.6628
v_1+v_5	279.7280	270.3292	254.5386
v_1+v_6	279.6882	270.2884	254.4970
v_1+v_7	279.6708	270.2706	254.4784
v_1+v_8	279.6618	270.2614	254.4692
v_1+v_9	279.6567	270.2561	254.4638

Table 9 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 15% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	282.4098	273.1553	257.5864
v_1+v_3	278.0134	268.7468	253.1666
v_1+v_4	276.6766	267.3999	251.8098
v_1+v_5	276.4100	267.1287	251.5339
v_1+v_6	276.3216	267.0382	251.4413
v_1+v_7	276.2829	266.9985	251.4006
v_1+v_8	276.2630	266.9780	251.3796
v_1+v_9	276.2516	266.9664	251.3675

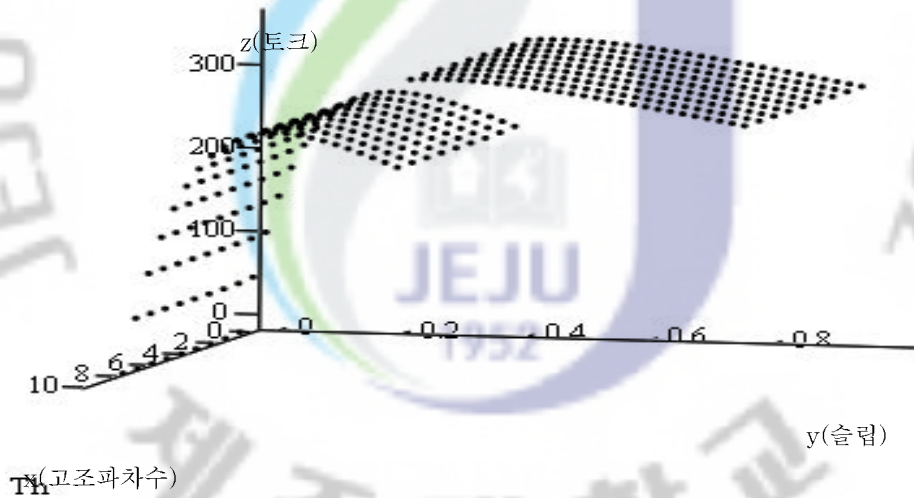


Fig. 5 Torque[sync.W] under the same resultant voltage of 10% VDF

Table 10 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 5% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	283.1444	273.6530	257.7059
v_1+v_3	282.6449	273.1521	257.2038
v_1+v_4	282.4930	272.9991	257.0496
v_1+v_5	282.4627	272.9683	257.0183
v_1+v_6	282.4527	272.9580	257.0077
v_1+v_7	282.4483	272.9535	257.0031
v_1+v_8	282.4460	272.9512	257.0007
v_1+v_9	282.4447	272.9499	256.9994

Table 11 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 10% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	285.2517	275.7710	259.8344
v_1+v_3	283.2537	273.7676	257.8259
v_1+v_4	282.6463	273.1555	257.2092
v_1+v_5	282.5251	273.0323	257.0839
v_1+v_6	282.4849	272.9912	257.0418
v_1+v_7	282.4673	272.9731	257.0233
v_1+v_8	282.4583	272.9638	257.0138
v_1+v_9	282.4531	272.9585	257.0083

Table 12 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 15% VDF

Voltage waveform (V)	Speed (rpm)		
	1450	1500	1550
v_1+v_2	288.7639	279.3011	263.3819
v_1+v_3	284.2685	274.7934	258.8627
v_1+v_4	282.9016	273.4162	257.4753
v_1+v_5	282.6291	273.1389	257.1932
v_1+v_6	282.5386	273.0464	257.0986
v_1+v_7	282.4990	273.0058	257.0569
v_1+v_8	282.4787	272.9849	257.0355
v_1+v_9	282.4671	272.9729	257.0231

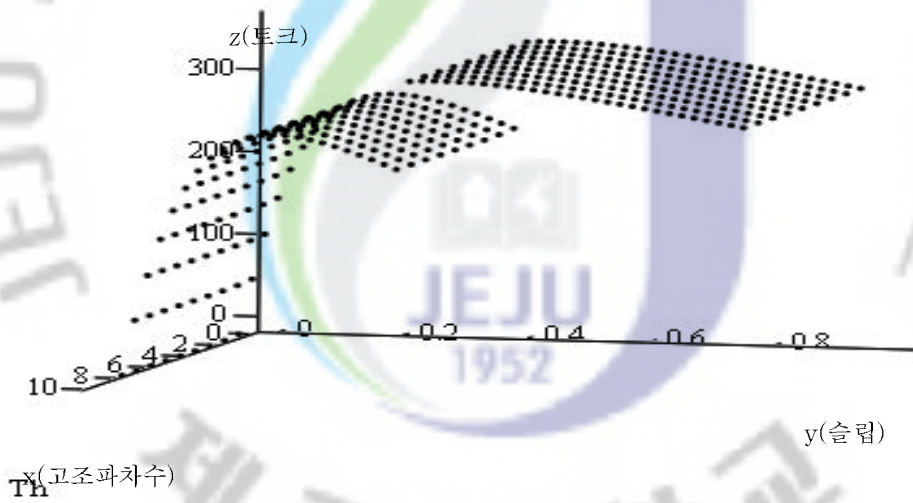


Fig. 6 Torque[sync.W] under the same fundamental voltage of 10% VDF

여기서 보듯이 토크는 동일 기본파 전압의 비정현파 전압이 인가된 경우가 동일 합성전압이 인가된 경우보다 크고, 합성된 고조파 전압의 차수가 높을 수록 작아지며, 정격속도보다 낮은 속도에서 크고 높은 속도에서 작아지고 있음을 알 수 있다.

이상에서 보듯이 지정된 전압 왜형률 아래서 동일 합성전압과 동일 기본파 전압의 비정현파 전압이 인가되었을 때, 전류 왜형률과 효율은 같은 값을 갖지만 이외의 특성들은 합성 전압의 차이에 의해 다른 값을 가지는 것을 알 수 있었다.



IV. 결 론

단상 비정현파 전압으로 운전되는 스타인메츠결선 유도전동기에 전압 왜형률이 다른 전압이 인가될 때 정격부하와 그 전후에서의 전동기 성능을 시뮬레이션하여 분석하였다. 해석을 위하여 무부하손실이 고려된 T형 등가회로를 사용하였고, 비정현파 전압은 기본파와 제 k 차 고조파의 합성전압으로 하고 합성 전압이 정격 전압과 동일한 경우와 기본파 전압이 정격전압과 동일하지만 전압 왜형률이 다른 경우로 나누어 시뮬레이션하였다. 해석에는 기본파와 고조파에 의한 대칭성분에 의하여 특성을 구하고, 중첩의 원리를 적용하여 합성하였다.

분석결과는 다음과 같다.

- 1) 합성 전압이 달라도 전압 왜형률이 같으면 전류 왜형률과 효율은 같다.
- 2) 한 전압 왜형률에서의 전류 왜형률을 알면 다른 전압 왜형률에서의 전류 왜형률을 전압 왜형률의 비로 얻을 수 있다.
- 3) 합성전압의 고조파 차수가 높을수록 전류 왜형률이 작아지고, 부하가 커질수록 전류 왜형률이 작아진다.
- 4) 합성전압의 고조파 차수가 높을수록 효율은 근소하지만 높아지고, 부하가 커질수록 효율이 낮아진다. 또한, 전압 왜형률이 커질수록 효율이 근소하게 낮아진다.
- 5) 토크는 합성전압이 크면 크고, 합성전압의 고조파 차수가 높을수록 커짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] C.Y.Lee and W.J.Lee, Effects of Nonsinusoidal Voltage on the operation performance of a Three-phase Induction Motor, IEEE Trans. on EC, Vol.14, No.2, pp.193-201, 1999.
- [2] L.A.Doggett and E.r.Queer, Induction Motor Operation with Non-Sinusoidal Impressed Voltages, Trans. AIEE, Vol.48, pp.1217-1220, 1929.
- [3] G.C.Jain, The Effect of Voltage Waveshape on the performance of a 3-Phase Induction Motor, IEEE Trans. on PAS, Vol.83, No.6, pp.561-566, 1964.
- [4] E.A.Klingshirn and H.E.Jordan, Poly-Phase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, No.3, pp.624-631, 1968.
- [5] A.Vamvakari, A.Kandianis, A.Kladas, S.Manias, and J.Tegopoulos, Analysis of Supply Voltage Distortion Effects on Induction Motor Operation, IEEE Trans. on EC, Vol.16, No.3, pp.209-213, 2001.
- [6] J.E.Brown and C.S.JHA, The starting of a 3-phase induction motor connected to a single-phase supply system, IEEE proc., 106pt.A, No.26, pp.183-190, 1959.
- [7] A.R.Daniels and B.R.Pelly, A locus diagram to determine the complete starting performance of a 3-phase induction motor connected to a single-phase supply, IEEE Proc., pt.c, No.15, pp.244-249, 1962.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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, UPEC2004, 39th International, pp.533-537, 2004.

- [11] 김도진, 좌종근, 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 손실분석, 전기학회 논문지, 57P권, 2호, pp.121-126, 2008.



감사의 글

“이루고자 하는 일이 시련과 역경에 부딪혀 그르치게 되면, 보통 사람들은 절망하게 된다. 그러나 이것은 시련이지 실패가 아니다. 내가 실패라고 생각하지 않는 한 이것은 실패가 아니다. 나는 생명이 있는 한 실패는 없다고 생각한다. 내가 살아 있고 건강한 한 나한테 시련은 있을지언정 실패는 없다.” 故정주영 회장이 남긴 말입니다. 2년이란 大學院 생활을 돌이켜보면 그동안 나에게도 많은 시련과 역경이 있었던 것 같습니다.

본 논문이 완성되기 까지 저를 위해 항상 기도하시고 지켜봐주신 아버지, 어머니에게 먼저 感謝의 인사를 올립니다. 그리고 많이 부족한 저에게 따뜻한 關心과 애정 어린 질타로 바른길로 인도해 주시고 大學院 졸업이라는 꿈과 희망을 잃지 않도록 지켜주신 좌종근 교수님께 글로나마 진심으로 깊은 感謝를 드립니다.

공학자로서 전공을 배움에 있어 진심과 열정으로 모든 것을 가르쳐 주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님께 깊은 感謝를 드립니다.

그리고 항상 바쁜 가운데서도 논문 작성에 도움을 주신 김도진 선배님, 대학원 생활에 적응하도록 도와준 현진협, 고영준, 김상연, 이진재 조교선생님께 感謝 드리며, 언제나 모범이 되고 의지할 수 있었던 강상수, 김석훈, 양완석, 강지윤 大學生 및 그 외 학우 여러분들께 고마움을 전하고 싶습니다.

이외에 고마움을 전하고 싶은 분들과 기쁨을 함께 나누고 싶은 사람이 많으나 지면에 남기지 못함을 죄송하게 생각하며 언제 어디서나 기대에 어긋나지 않고 모범이 되는 사람이 되도록 最善을 다하겠습니다.

2009年 12月

구창호 올림