


博士學位論文

單相電源에 接續된 3相 誘導電動機의
運轉特性 解析

The logo of Jeju National University is a large, faint watermark in the background. It features a stylized flame or leaf shape in blue, green, and grey, with a purple 'J' shape to the right. The text 'JEJU NATIONAL UNIVERSITY 1952' is written in a circular path around the central graphic. Below the logo, the text 'JEJU 1952' is visible.

濟州大學校 大學院

電氣電子工學科

金 度 進

2008年 12月

單相電源에 接續된 3相 誘導電動機의 運轉特性 解析

指導教授 左宗根

金度進

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2008年 12月

金度進의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 1952 員 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2008年 12月

Analysis of Operation Characteristics of a
Three-phase Induction Motor Connected to the
Single-phase Source

Do-Jin Kim

(Supervised by Professor Chong-Keun Jwa)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING

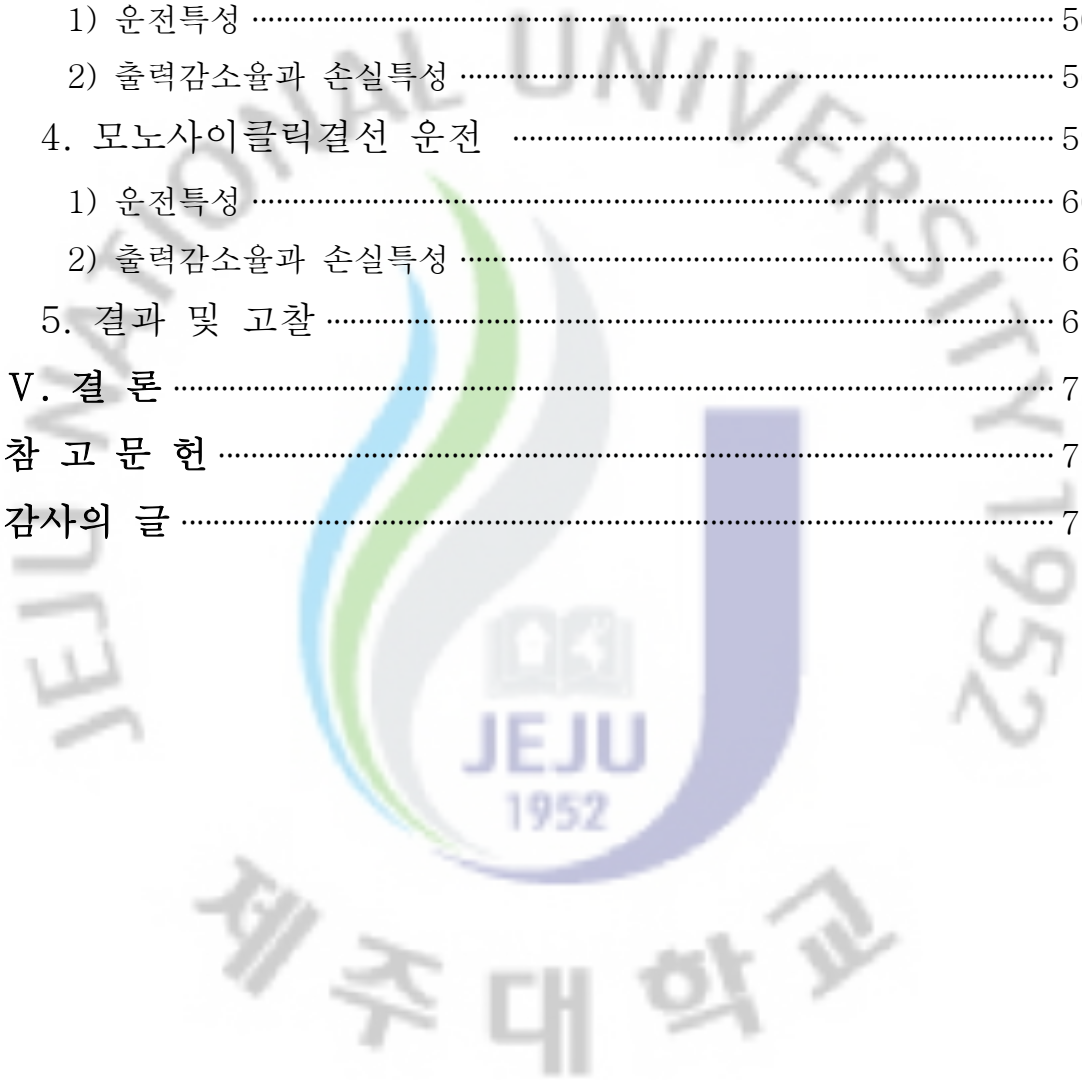
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2008. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
LIST OF SYMBOLS	vi
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
II. 3상 유도전동기의 단상운전 해석이론	5
1. 단상결선 운전	5
1) 델타결선	7
2) 스타결선	10
3) 단상결선에서의 운전	12
2. 스타인메츠결선 운전	16
1) 스타인메츠결선과 회로방정식	16
2) 스타인메츠결선에서의 운전	19
3. 모노사이클릭결선 운전	22
1) 모노사이클릭결선과 회로방정식	22
2) 모노사이클릭결선에서의 운전	25
III. 손실특성 및 상변환기 결정	28
1. 3상 평형운전에서의 운전특성	28
2. 출력감소율과 손실비	31
3. 상변환기 결정	32
1) 스타인메츠결선에서의 상변환기 커패시턴스 결정	32
2) 모노사이클릭결선에서의 상변환기 리액턴스 결정	34
IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰	36

1. 등가회로 정수에 의한 토크특성	37
2. 단상결선 운전	39
1) 운전특성	39
2) 출력감소률과 손실특성	45
3. 스타인메츠결선 운전	49
1) 운전특성	50
2) 출력감소율과 손실특성	56
4. 모노사이클릭결선 운전	59
1) 운전특성	60
2) 출력감소율과 손실특성	66
5. 결과 및 고찰	69
V. 결 론	71
참 고 문 헌	73
감사의 글	76



LIST OF FIGURES

Fig. 1 Single-phase connections for three-phase induction motor connected to single-phase source, (a) Delta connection, (b) Star connection	6
Fig. 2 Equivalent circuit for single-phase operation	9
Fig. 3 Steinmetz single-phase connection for three-phase induction motor	16
Fig. 4 Equivalent circuit models per phase considered no load loss, (a) Positive equivalent circuit, (b) Negative equivalent circuit	18
Fig. 5 Monocyclic single-phase connection for three-phase induction motor	22
Fig. 6 Equivalent circuit models per phase considered no load loss, (a) Positive equivalent circuit, (b) Negative equivalent circuit	24
Fig. 7 Equivalent circuit per phase for balance operation	28
Fig. 8 Speed-torque characteristics under three-phase balance operation, (a) Torque characteristics computed by measured and manufacturer's data, (b) Torque difference from Fig. 8 (a)	37
Fig. 9 Symmetrical component voltages and currents, (a) Symmetrical component voltages, (b) Symmetrical component currents	39
Fig. 10 Variation of voltage unbalance factor	40
Fig. 11 Variation of current unbalance factor	41
Fig. 12 Variation of phase voltages and currents, (a) Phase voltages, (b) Phase currents	42
Fig. 13 Power factor characteristics	43
Fig. 14 Torque characteristics	43
Fig. 15 Output characteristics	44
Fig. 16 Efficiency characteristics	45
Fig. 17 Variation of output power decrease factor and loss ratio, (a) Output power decrease factor, (b) Loss ratio	46

Fig. 18	Variation of no load loss and copper loss ratio	47
Fig. 19	Variation of stator copper loss and rotor copper loss ratio	47
Fig. 20	Symmetrical component voltages and currents, (a) Symmetrical component voltages, (b) Symmetrical component currents	51
Fig. 21	Variation of voltage unbalance factors	52
Fig. 22	Variation of current unbalance factor	52
Fig. 23	Variation of phase voltages and currents, (a) Phase voltages, (b) Phase currents	53
Fig. 24	Power factor characteristics	54
Fig. 25	Torque characteristics	55
Fig. 26	Output characteristics	55
Fig. 27	Efficiency characteristics	56
Fig. 28	Variation of output power decrease factor and loss ratio, (a) Output power decrease factor, (b) Loss ratio	57
Fig. 29	Variation of no load loss and copper loss ratio	57
Fig. 30	Variation of stator copper loss and rotor copper loss ratio	58
Fig. 31	Symmetrical component voltages and currents, (a) Symmetrical component voltages, (b) Symmetrical component currents	60
Fig. 32	Variation of voltage unbalance factors	61
Fig. 33	Variation of current unbalance factor	62
Fig. 34	Variation of phase voltages and currents, (a) Phase voltages, (b) Phase currents	63
Fig. 35	Power factor characteristics	64
Fig. 36	Torque characteristics	64
Fig. 37	Output characteristics	65
Fig. 38	Efficiency characteristics	65
Fig. 39	Variation of output power decrease factor and loss ratio, (a) Output power decrease factor, (b) Loss ratio	66
Fig. 40	Variation of no load loss and copper loss ratio	67
Fig. 41	Variation of stator copper loss and rotor copper loss ratio	67

LIST OF TABLES

Table 1 Equivalent circuit parameters	36
Table 2 Computed results of capacitance with three methods	49
Table 3 X_c and C computed by condition of minimum voltage unbalance factor	50
Table 4 Comparison of both X_c and X_L computed by known and proposed methods	59



LIST OF SYMBOLS

V	입력전압
I	입력전류
V_a, V_b, V_c	상전압
I_a, I_b, I_c	상전류
f_a, f_b, f_c	3상 임의의 변수
f_z, f_p, f_n	영상분, 정상분, 역상분
V_p, V_n	정상분전압과 역상분전압
I_p, I_n	정상분전류와 역상분전류
Z_p, Z_n	정상분 임피던스와 역상분 임피던스
Z_{in}	입력 임피던스
p_{c1}, p_{c2}, p_{ct}	단상운전에서의 1차 동손과 2차 동손 그리고 총 동손
$p_{c1b}, p_{c2b}, p_{ctb}$	3상 평형운전에서의 1차 동손과 2차 동손 그리고 총 동손
p_i, p_{lt}	단상운전에서의 무부하손과 총 손실
p_{ib}, p_{ltb}	3상 평형운전에서의 무부하손과 총 손실
T	단상운전에서의 토크
P_2	단상운전에서의 2차 입력
P_m	단상운전에서의 기계출력
η	단상운전에서의 효율
PF	단상운전에서의 역률
$Re(S_{inu})$	단상운전에서의 복소입력의 실수부
T_b	3상 평형운전에서의 토크
P_{2b}	3상 평형운전에서의 2차 입력
P_{mb}	3상 평형운전에서의 기계출력

η_b	3상 평형운전에서의 효율
PF_b	3상 평형운전에서의 역률
$Re(S_{inb})$	3상 평형운전에서의 복소입력의 실수부
V_{cap}, I_{cap}	커패시터의 전압과 전류
V_L, I_L	리액터의 전압과 전류
X_c, X_L	용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스
T_{1b}	측정정수에 의한 토크
T_{2b}	제작회사에서 제공한 정수에 의한 토크
T_d	토크차(T_{1b} 와 T_{2b} 의 토크차)

이하는 아래첨자

p	정상분
n	역상분
s	기동시
r	정격속도시
u	불평형운전(단상운전)
b	3상 평형운전

이하는 윗첨자

t	전치행렬
-----	------

SUMMARY

This dissertation analyzes the operation characteristics of three-phase induction motor connected to the single-phase source. For the analysis, T-type equivalent circuit which is taken account of no load loss is used and the symmetrical component analysis is applied to derive related expressions which represent operation characteristics. When the motor is operated by single-phase source, the operation characteristics are computed by applying phase converter reactance evaluated at starting and rated speed in order to minimize the voltage unbalance. After that, by comparing operation characteristics obtained in each single-phase operation with those of three-phase balance operation, the characteristics of three-phase induction motor connected to single-phase is analyzed.

The methods of single-phase operation used in this study are single-phase, Steinmetz and monocyclic connection. Features of this study are as followings. In order to decrease the voltage unbalance during the single-phase operation in Steinmetz connection, the phase converter capacitances are determined by calculating them at starting and rated speed respectively using the condition of the minimum voltage unbalance. Also, the phase converter reactances in monocyclic connection are evaluated by using the voltage unbalance factor itself which is able to apply at an arbitrary speed. This study suggests a method of simple calculation by applying the condition of balance operation from the voltage unbalance factor, which makes it possible to determine the phase converter reactances by using Mathcad software without any complicated algebraic calculation. The application of proposed method is confirmed by comparing with the known method.

Furthermore, the OPDF(output power decrease factor) in the ratio of output power during single-phase operation to output power during three-phase balance operation and the LR(loss ratio) in the ratio of loss during single-phase operation to loss during three-phase balance operation are defined and evaluated respectively. For total loss during single-phase operation, every loss characteristics of three-phase induction motor connected to single-phase source is analyzed by defining and computing

each proportion of CLR(copper loss ratio), NLLR(no load loss ratio), SCLR(stator copper loss ratio), RCLR(rotor copper loss ratio).

As the results of the operation characteristics of three-phase induction motor connected to single-phase source, it is found that it is possible to operate by itself by getting starting torque in the single-phase operation with Steinmetz and monocyclic connection and the operation characteristics of these two connections do not decrease very largely. Then, the availability of the two methods of connection in single-phase operation is confirmed and the operation with monocyclic connection can be obtained more suitable operation characteristics.



I. 서론

3상 유도전동기는 대칭 3상 전압으로 운전하는 것이 정상이지만 부득이 단상 전원만으로 전력이 공급되는 경우이거나 전압불평형의 극단적인 예로써 3상 운전 중 1상이 결상되는 등의 돌발 상황이 발생하게 될 때 일반적인 3상 유도전동기에는 3상 전압이 유도되는 3상 1차권선의 형태를 갖지 않는 한 기동토크가 발생되지 않는다. 이에 대처하여 단상전원만으로 전압불평형률을 최소화하여 기동 및 운전토크를 얻어서 3상 유도전동기를 운전하는 경우가 있다.

단상전원에 의해서 3상 유도전동기를 운전할 때 최소의 불평형전압으로 기동과 운전에 필요한 토크를 얻어 출력을 발생시키기 위한 결선으로 다음과 같은 방법 등이 있다. 3상 유도전동기에서 전원상의 권선단자에 한 개의 커패시터 상변환기를 접속하여 사용하는 스타인메츠결선 방법과 전원이 접속되지 않은 두 개의 상에 각각 상변환기로 서로 다른 리액턴스 소자를 접속하여 사용하는 모노사이클릭결선 방법이다.

이 경우 단상전원에 의한 불평형 운전을 할 때 불평형 전압에 의한 기기의 동작특성 평가가 매우 복잡하게 된다. 고정자 권선전류에서의 영상분과 역상분의 발생으로 인해 고정자 권선에 의한 회전자 권선으로의 전압유도, 회전자 권선전류 그리고 전자기 토크 등에 좋지 않은 영향이 나타나게 된다.

스타인메츠결선 전동기에 대한 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Brown과 Jha는 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 기동시 특성을 3상 평형 조건하에서 정지시 전동기 어드미턴스와 상변환기의 커패시턴스 비로 정의한 파라미터와 이들 어드미턴스 각의 차로 정의한 파라미터를 분석하는 방법을 제시하였다[1]. Deniels와 Pelly는 기동특성을 궤적도에 의하여 구하고, 특히 최소 전압불평형률에 대한 어드미턴스 비로 몇 개의 최적조건을 얻었다[2]. Murthy 등은 특정슬립에서 전압불평형률이 최소가 되는 조건으로 커패시턴스를 구하는 방법을 제시하였고[3], Oliveira는 전압불평형률이 영(zero)이 되는 슬립과 커패시턴스를 구하는 방법을 제시하였다[4]. Al-Isawi와 Adem은 단상인버터 전원

의하여 운전될 때의 기동시 동특성을 해석하였으며[5], 김과 좌는 전압불평형률이 영(zero)이 되는 조건에 의한 용량성 리액턴스로 와이결선 전동기의 특성 분석[6], 델타결선에서의 용량성 리액턴스 결정방법의 비교[7], 두 가지 스타인메츠결선에서의 권선전류 분석[8], 그리고 스타인메츠결선에서 기동과 정격 속도에서의 용량성 리액턴스에 의한 특성분석[9], 스타인메츠결선의 단상전원에 접속된 3상 유도전동기에 대한 손실분석[10], 그리고 스타인메츠결선과 수정된 스타인메츠결선에서의 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 권선전류를 분석하였다[11].

모노사이클릭결선 유도전동기에 대한 연구들을 살펴보면, Irida는 전압평형 조건을 사용하여 최적제어를 하였고 [12], Morishita 등은 고정자에 비대칭 권선을 사용한 모노사이클릭결선 유도전동기를 제시하였으며[13], Iwahashi 등은 인덕터와 직렬로 사이리스터를 접속하여 원하는 슬립에서 평형운전하는 방법을 연구하였다[14]. 그리고 Alwashi는 전압불평형률이 영(zero)이 되는 조건으로 용량성 리액턴스와 유도성 리액턴스를 사용하여 전동기 특성을 분석하였으며[15], 김과 좌는 모노사이클릭기동 유도전동기에 대한 상변환기 리액턴스 결정방법 등을 발표하였다[16]. 또한, 이에 대한 자기여자 발전기의 연구로 Bhattacharya와 Woodward는 최대출력을 얻기 위한 방법을[17], Chan은 스타인메츠결선에서의 운전특성을 보고하였고 [18], Chan과 Lai는 자기여자를 위한 커패시턴스 결정방법을 제시하였다[19].

그러나 기존의 연구에서는 모두 무부하손실에 대한 정수가 직접 반영되어 있지 않은 IEEE 권장 등가회로[20]를 사용하여 제반 운전특성을 해석하고 있으며, 스타인메츠결선 단상운전에서의 상변환기 커패시턴스 결정하는 방법에서는 커패시턴스를 각각의 결정방법에 따라 결정한 결과치에 대해서만 해석되어 있다. 그리고 모노사이클릭결선 단상운전에서 전압불평형률을 줄여 운전하기 위한 상변환기 리액턴스를 결정하는 방법에 있어 기존의 방법으로는 각 슬립에서 정상분 임피던스의 저항과 리액턴스 성분을 계산하기 위해서 대수계산이 복잡하게 되는 번거로움이 있다.

따라서 본 논문에서는 제작회사에서 제공한 무부하손실이 반영되지 않은 정수와 측정에 의해 얻은 무부하손실이 반영된 정수[21]를 사용하여 3상 평형운

전에서 전 운전범위에 대해 토크차이를 비교하였다. 그 결과, 두 정수에 의한 특성차이가 무부하손실이 무시할 수 없을 정도로 발생하고 있으므로 무부하손실이 반영된 T형 등가회로[22, 23] 정수를 특성계산에 사용하였다. 또한, 모노사이클릭결선 운전의 상변환기 리액턴스 결정시 대수계산 없이 응용 소프트웨어를 사용하여 간단하게 상변환기 리액턴스를 결정할 수 있는 두 가지 방법을 제안한다.

스타인메츠결선에서는 임의의 슬립에서 상변환기 커패시턴스를 구할 수 있는 최소 전압불평형률 조건에 의한 방법을 사용하고 모노사이클릭결선 단상운전에서는 상변환기 리액턴스를 전압불평형률이 영(zero)이 되는 평형운전 조건식을 사용하여 기동시와 정격운전속도에서 상변환기 리액턴스를 각각 구한다. 이와 같이 기동시와 정격운전속도에서 구한 두개의 상변환기 리액턴스를 사용하고 전압불평형률이 같게 되는 슬립에서 교체하여 단상운전 특성을 계산한다. 이상 각각의 단상운전 결선방식에서 구한 단상운전특성을 3상 평형운전시의 운전특성과 비교하여 대칭분전압과 대칭분전류, 전압불평형률, 전류불평형률, 상전압과 상전류, 역률특성, 토크특성, 출력특성, 효율특성 등을 분석하고, 단상결선, 스타인메츠결선, 모노사이클릭결선 단상운전시 손실특성을 분석하기 위하여 다음과 같이 손실비 등을 각각 정의한다. 3상 평형운전시 출력에 대한 단상운전시 출력비율로 출력감소율을, 3상 평형운전시 손실에 대한 단상운전시 손실비율로 손실비를 정의하여 계산하고, 또한 단상운전시 총 손실에 대하여 무부하손비, 동손비, 고정자 동손비, 회전자 동손비 등이 차지하는 비율 등을 각각 정의한 후 단상 운전시의 손실을 계산하여 분석한다.

이상과 같이 단상전원에 접속된 3상 유도전동기를 단상결선, 스타인메츠결선 그리고 모노사이클릭결선으로 운전하였을 때의 단상운전 특성을 시뮬레이션한다. 그리고 그 결과를 3상 평형운전 특성과 비교하여 단상전원에 의한 3상 유도전동기의 제반 운전특성을 분석하고 운전가능성을 확인한다.

본 논문의 전개 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경 및 내용에 대해서 살펴보고, 제2장에서는 유도전동기의 단상운전 해석이론에 대하여 단상결선 운전, 스타인메츠결선 운전, 모노사이클릭결선 운전 등으로 나누어 기술한다. 제3장에서는 본 논문에서 정의한 출력감

소율과 각종 손실특성 그리고 단상운전시 전압불평형을 최소화하여 운전하기 위한 상변환기 리액턴스 결정방법 등을 제시하고, 제4장에서는 각각의 단상운전 방식에서 제반운전 특성을 시뮬레이션한 결과와 3상 평형운전의 결과를 비교 분석한다. 끝으로 제5장에서는 본 논문의 결론을 요약 정리하고 향후 연구되어야 할 사항들을 제안한다.



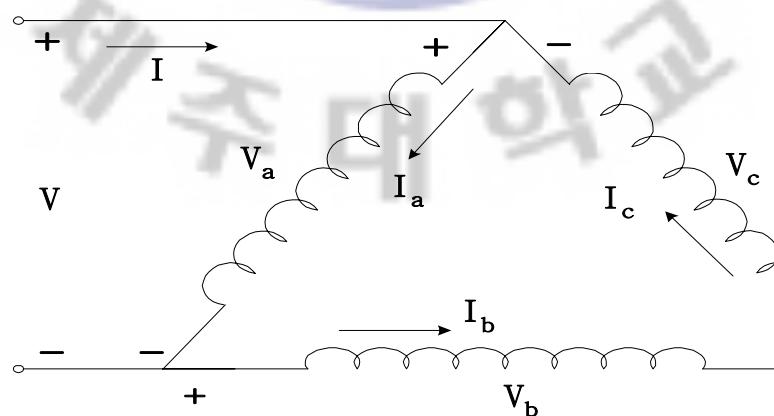
II. 3상 유도전동기의 단상운전 해석이론

단상결선, 스타인메츠결선, 모노사이클릭결선의 단상운전은 단상전원에 의한 불평형 운전이므로 불평형 상태를 해석하기 위한 전력불변 대칭성분 변환행렬을 적용하여 해석이론을 정리한다. 이를 위하여 무부하손실을 고려한 T형 등가회로를 사용해서 각각의 단상운전에서 회로방정식을 세워 대칭분전압과 대칭분 임피던스를 구하고, 단상운전시 전압불평형률을 계산하기 위한 식을 정의한다. 또한 각각의 단상운전에 대하여 상전압, 상전류, 1차 동손, 2차 동손, 무부하손, 토크, 출력, 효율, 역률 등의 운전특성 방정식을 유도한다. 그리고 해석에 사용한 모든 등가회로는 다음과 같은 가정을 둔다.

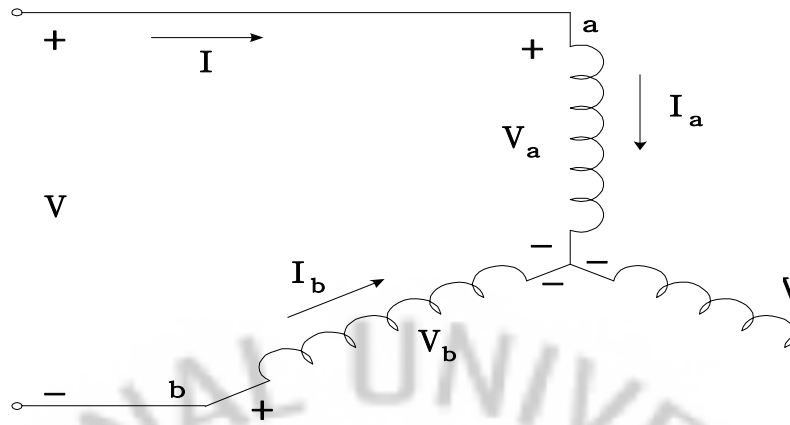
- 인가전압은 정현파이고 전압과 주파수는 일정하다.
- 모든 등가회로 정수는 상수로 취급한다.
- 철심의 포화는 무시한다.

1. 단상결선 운전

단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 델타결선과 스타결선한 단상운전의 결선도를 Fig. 1에 나타낸다.



(a) Delta connection



(b) Star connection

Fig. 1 Single-phase connections for three-phase induction motor connected to single-phase source

여기서 V 와 I 는 각각 입력전압과 입력전류이고, V_a, V_b, V_c 는 상전압, I_a, I_b, I_c 는 상전류를 나타낸다.

불평형 상태를 해석하기 위한 전력불변 대칭성분 변환행렬을 나타내면 식(1) 과 같이 된다.

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

여기서, 변환연산자 $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ 이다.

이 변환행렬을 적용한 3상 변수와 대칭성분 변수 간의 관계식은 다음과 같다.

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

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

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

여기서, f_a, f_b, f_c 는 각각 a상, b상, c상의 임의의 변수이고, f_z, f_p, f_n 은 각각 영상분, 정상분 그리고 역상분 변수이다. 그리고 단상 델타결선과 스타결선 모두 중성점이 접지방식이 아니기 때문에 영상분은 고려하지 않는다.

1) 델타결선

Fig. 1의 결선도로부터 델타결선과 스타결선인 경우를 분리하여 별도로 회로 방정식에 의한 정상분전압과 역상분전압 그리고 입력전류와 입력 임피던스를 계산한다.

Fig. 1 (a)의 회로에 대하여 회로방정식을 세우면 식(5), (6), (7)과 같고, 대칭분 전류는 식(8), (9)로 놓을 수 있다.

$$V_a = V \tag{5}$$

$$I = I_a - I_c \tag{6}$$

$$I_b = I_c \tag{7}$$

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} \tag{8}$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \tag{9}$$

대칭성분 변환행렬을 이용해서 식(5)에 대입하여 풀면 식(10)이 된다.

$$V_p + V_n = \sqrt{3} V \tag{10}$$

식(7)을 대칭성분으로 나타내면 식(11)과 같이 되고, 식(8), (9)를 식(11)에 대입하여 풀면 다음과 같이 식(12)가 된다.

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(a^2 I_p + a I_n - a I_p - a^2 I_n) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{(a^2 - a) V_p}{Z_p} - \frac{(a^2 - a) V_n}{Z_n} = 0 \quad (12)$$

식(10), (12)로부터 정상분전압과 역상분전압을 연립하여 풀면 아래의 식(13), (14)와 같다.

$$V_p = \frac{\sqrt{3} V Z_p}{Z_p + Z_n} \quad (13)$$

$$V_n = \frac{\sqrt{3} V Z_n}{Z_p + Z_n} \quad (14)$$

Fig. 1 (a)의 델타결선에서 입력전류 계산은 식(6)의 우변을 대칭성분으로 전개하여 풀면 식(15)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{\sqrt{3}}(I_p + I_n - a I_p - a^2 I_n) = \frac{1}{\sqrt{3}}[(1-a)I_p + (1-a^2)I_n] \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}}[(1-a)\frac{V_p}{Z_p} + (1-a^2)\frac{V_n}{Z_n}] = \frac{1}{\sqrt{3}}[(1-a)\frac{\frac{\sqrt{3} V Z_p}{Z_p + Z_n}}{Z_p} + (1-a^2)\frac{\frac{\sqrt{3} V Z_n}{Z_p + Z_n}}{Z_n}] \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}}[(1-a)\frac{\sqrt{3} V}{Z_p + Z_n} + (1-a^2)\frac{\sqrt{3} V}{Z_p + Z_n}] = (2-a-a^2)\frac{V}{Z_p + Z_n} = \frac{3V}{Z_p + Z_n} \end{aligned} \quad (15)$$

그리고 입력 임피던스 계산은 입력전압과 전류로부터 아래의 식(16)과 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{Z_p + Z_n}{3} \quad (16)$$

단상결선 운전에서의 등가회로를 나타내면 Fig. 2와 같다.

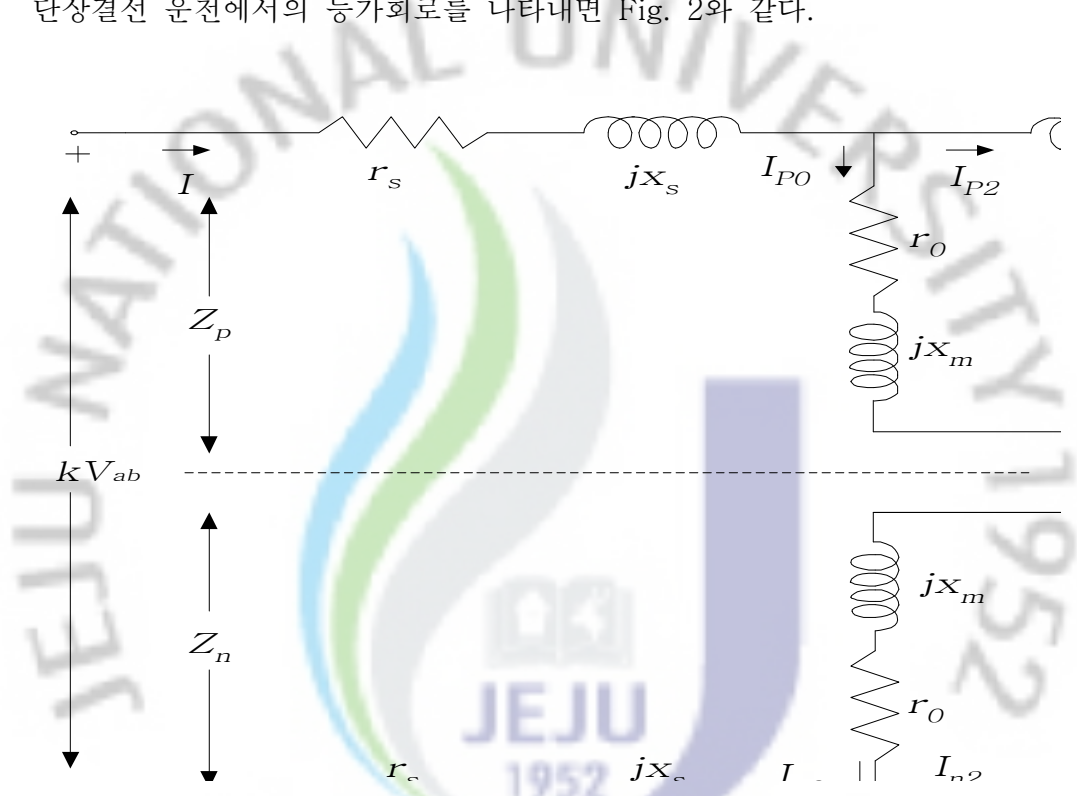


Fig. 2 Equivalent circuit for single-phase operation

델타와 스타결선에서 서로 등가가 되기 위해서는 식(15), (16)과 식(31), (32)로부터 Fig. 2 등가회로의 입력전압에 있는 상수(k)는 델타결선에서 $k=3$ 이고, 스타결선에서 $k=1$ 이 된다.

3상 유도전동기의 불평형 운전에 따른 일반적인 정상분 임피던스와 역상분 임피던스는 Fig. 2의 등가회로로부터 다음의 식(17), (18)로 나타낸다.

$$Z_p = r_s + jx_s + \frac{(r_0 + jx_m)\left(\frac{r_r}{s} + jx_r\right)}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} \quad (17)$$

$$Z_n = r_s + jx_s + \frac{(r_0 + jx_m)\left(\frac{r_r}{2-s} + jx_r\right)}{r_0 + \frac{r_r}{2-s} + j(x_m + x_r)} \quad (18)$$

2) 스타결선

Fig. 1 (b)의 회로에 대하여 회로방정식을 세우면 식(19), (20), (21)과 같이 되며, 대칭분전류는 식(22), (23)으로 놓을 수 있다.

$$V = V_a - V_b \quad (19)$$

$$I = I_a \quad (20)$$

$$I_a = -I_b \quad (21)$$

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} \quad (22)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (23)$$

이 회로방정식들과 식(1)의 변환행렬을 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있는데, 식(19)를 대칭성분으로 풀면 식(24), (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(V_p + V_n - a^2 V_p - a V_n) = V \quad (24)$$

$$(1-a^2)V_p + (1-a)V_n = \sqrt{3} V \quad (25)$$

또한, 식(21)를 대칭성분으로 풀면 식(26), (27)과 같이 된다.

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(I_p + I_n + a^2 I_p + a I_n) = 0 \quad (26)$$

$$(1+a^2)I_p + (1+a)I_n = 0 \quad (27)$$

그리고 식(22)와 식(23)을 식(27)에 대입하여 계산하면 아래의 식(28)이 된다.

$$\frac{(1+a^2)V_p}{Z_p} + \frac{(1+a)V_n}{Z_n} = 0 \quad (28)$$

식(25), (28)로부터 정상분전압과 역상분전압을 연립하여 풀면 식(29), (30)과 같다.

$$V_p = \frac{\sqrt{3} V Z_p (1+a)}{a(1-a)(Z_p + Z_n)} \quad (29)$$

$$V_n = \frac{-\sqrt{3} V Z_n (1+a^2)}{a(1-a)(Z_p + Z_n)} \quad (30)$$

입력전류의 계산은 식(21)을 대칭성분으로 전개하여 풀면 식(31)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_p + I_n) = \frac{1}{\sqrt{3}}\left(\frac{V_p}{Z_p} + \frac{V_n}{Z_n}\right) = \frac{(1+a)V - (1+a^2)V}{a(1-a)(Z_p + Z_n)} = \frac{V}{Z_p + Z_n} \quad (31)$$

그리고 입력 임피던스 계산은 입력전압과 전류로부터 계산하면 다음과 같이 간단하게 구할 수 있게 된다.

$$Z_{in} = \frac{V}{I} = Z_p + Z_n \quad (32)$$

3) 단상결선에서의 운전

유도전동기에서 손실은 크게 1차 전류에 의한 고정자 저항에서의 1차 동손, 2차 전류에 의한 회전자 저항에서의 2차 동손, 여자전류에 의한 철손, 그 외에 기계손, 표유부하손 등으로 구별할 수 있다. 여기서는 전기적인 손실인 1차 동손, 2차 동손 그리고 무부하손실을 계산하여 손실비(LR; loss ratio), 무부하손비(NLLR; no load loss ratio), 고정자 동손비(SCLR; stator copper loss ratio), 회전자 동손비(RCLR; rotor copper loss ratio) 등으로 정의하여 나타낸다. 운전특성인 대칭분전압과 전류, 전압불평형률, 전류불평형률, 상전압과 상전류, 역률 특성, 토크 특성, 출력 특성, 효율 특성, 출력감소율(OPDF; output power decrease factor)과 손실비, 동손비와 무부하손비 그리고 고정자 동손비와 회전자 동손비 등에 관련된 식들을 도출한다.

단상운전의 상전압과 상전류는 대칭성분 변환행렬식을 이용하여 다음의 식(33), (34), (35), (36), (37), (38)로 구한다.

$$V_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(V_p + V_n) \quad (33)$$

$$V_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2 V_p + a V_n) \quad (34)$$

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(aV_p + a^2V_n) \quad (35)$$

$$I_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_p + I_n) \quad (36)$$

$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2I_p + aI_n) \quad (37)$$

$$I_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(aI_p + a^2I_n) \quad (38)$$

식(13), (14), (17), (18)로부터 1차권선에서의 동손계산을 위한 정상분전류와 역상분전류를 계산하면 다음의 식(39), (40)과 같다.

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} \quad (39)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (40)$$

2차권선에서의 동손계산을 위한 2차권선의 정상분전류와 역상분전류는 Fig. 2의 등가회로로부터 다음의 식(41), (42)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{p2} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_p \quad (41)$$

$$I_{n2} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{(2-s)} + j(x_m + x_r)} I_n \quad (42)$$

식(39), (40)으로부터 1차 동손을, 식(41), (42)로부터 2차 동손을 계산하고, 이렇게 구해진 1차 동손과 2차 동손의 합으로 총 동손을 계산하면 다음의 식(43), (44), (45)가 된다.

$$P_{c1} = (|I_p|^2 + |I_n|^2) r_s \quad (43)$$

$$P_{c2} = (|I_{p2}|^2 + |I_{n2}|^2) r_r \quad (44)$$

$$P_{ct} = P_{c1} + P_{c2} \quad (45)$$

여자전류에 의한 무부하손을 구하기 위해 Fig. 2의 등가회로로부터 정상분 여자전류와 역상분 여자전류를 구하면 다음의 식(46), (47)과 같다.

$$I_{pi} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_p \quad (46)$$

$$I_{ni} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{(2-s)} + j(x_m + x_r)} I_n \quad (47)$$

식(46), (47)에서 계산된 정상분 여자전류와 역상분 여자전류로부터 무부하손을 구하고, 이 값으로부터 전기적인 총 손실을 구하면 다음의 식(48), (49)가 된다.

$$P_i = (|I_{pi}|^2 + |I_{ni}|^2) r_0 \quad (48)$$

$$P_{lt} = P_{ct} + P_i \quad (49)$$

그리고 토크, 2차 입력, 출력, 효율 그리고 역률 등의 운전특성은 다음의 식으로

계산한다. 토크 $\text{sync} \cdot W$ 는 2차 입력과 같으므로 2차권선의 정상분전류와 역상 분전류인 식(41), (42)로부터 2차 입력을 구한 후 아래의 식(50), (51)과 같이 토크와 출력을, 그리고 효율과 역률계산은 식(15)의 입력전류로부터 다음의 식 (52), (53)으로 구한다.

$$T = P_2 = \frac{r_r}{s} |I_{p2}|^2 - \frac{r_r}{(2-s)} |I_{n2}|^2 \quad (50)$$

$$P_m = P_2(1-s) \quad (51)$$

$$\eta = \frac{P_m}{\text{Re}(S_{inu})} \quad (52)$$

$$PF = \frac{\text{Re}(I)}{|I|} \quad (53)$$

여기서 $S_{inu} = VI^*$ 이다.

2. 스타인메츠결선 운전

1) 스타인메츠결선과 회로방정식

아래의 Fig. 3은 단상전원에 의해서 3상 유도전동기를 운전하는 경우 상변환기로 사용된 하나의 커패시터를 전원이 인가된 권선에 대하여 앞선 상의 권선에 접속된 스타인메츠결선을 나타낸다.

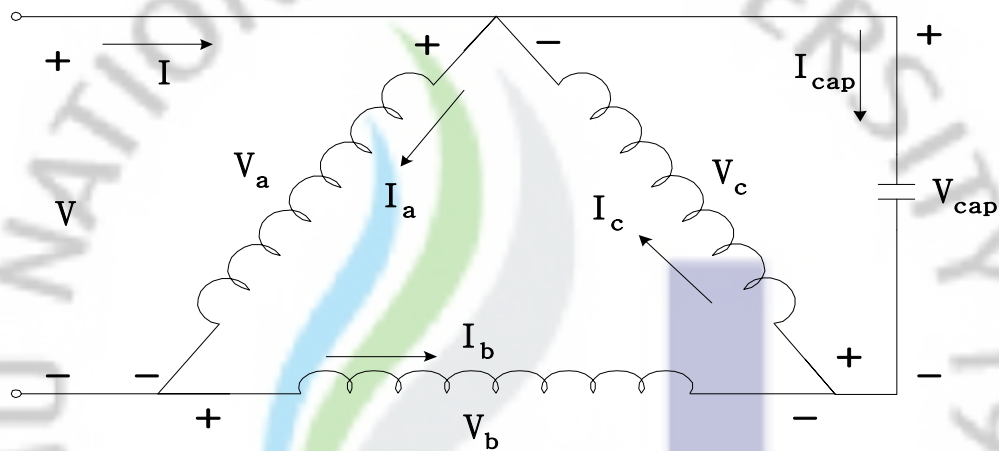


Fig. 3 Steinmetz single-phase connection for three-phase induction motor

불평형 문제를 해석하기 위해서 식(1), (2), (3), (4)와 같은 방법으로 전력불변 대칭성분 변환행렬을 사용하여 상변수와 대칭성분 변수를 취해서 해석한다.

Fig. 3의 회로를 해석하기 위하여 회로방정식을 세우면 다음의 식(54), (55), (56), (57)이 된다.

$$V_a = V \quad (54)$$

$$V_{cap} = -V_c = Z_{cap} I_{cap} \quad (55)$$

$$I_{cap} = I_c - I_b \quad (56)$$

$$I = I_a - I_c + I_{cap} \quad (57)$$

Fig. 3의 회로는 델타결선이므로 영상분의 계산은 필요 없다. 그리고 이 회로 방정식들을 대칭분 전압식으로 변환하기 위하여 식(58), (59)의 관계를 사용한다.

$$V_p = Z_p I_p \quad (58)$$

$$V_n = Z_n I_n \quad (59)$$

식(54), (55)를 대칭성분 변환행렬을 이용하여 나타내면 다음과 같이 식(60), (61)이 된다.

$$V_p + V_n = \sqrt{3} V \quad (60)$$

$$-\left[a - (a^2 - a) \frac{Z_{cap}}{Z_p}\right] V_p - \left[a^2 + (a^2 - a) \frac{Z_{cap}}{Z_n}\right] V_n = 0 \quad (61)$$

식(60)과 (61)을 연립하여 정상분전압과 역상분전압에 대하여 풀면 다음의 식(62), (63)이 된다. 아래의 식에서 $Z_{cap} = -jX_c$ 이다.

$$V_p = \frac{\sqrt{3} \left(\frac{a^2}{a^2 - a} + \frac{Z_{cap}}{Z_n} \right) V}{1 + \frac{Z_{cap}}{Z_p} + \frac{Z_{cap}}{Z_n}} \quad (62)$$

$$V_n = \frac{-\sqrt{3} \left(\frac{a}{a^2 - a} - \frac{Z_{cap}}{Z_p} \right) V}{1 + \frac{Z_{cap}}{Z_p} + \frac{Z_{cap}}{Z_n}} \quad (63)$$

이 두 식으로부터 전압불평형률 (VUF; voltage unbalance factor)[24]은 다음의 식(64)로 구한다.

$$VUF = \frac{|V_n|}{|V_p|} \quad (64)$$

무부하손실을 고려한 정상분 등가회로와 역상분 등가회로를 아래 Fig. 4에 보인다.

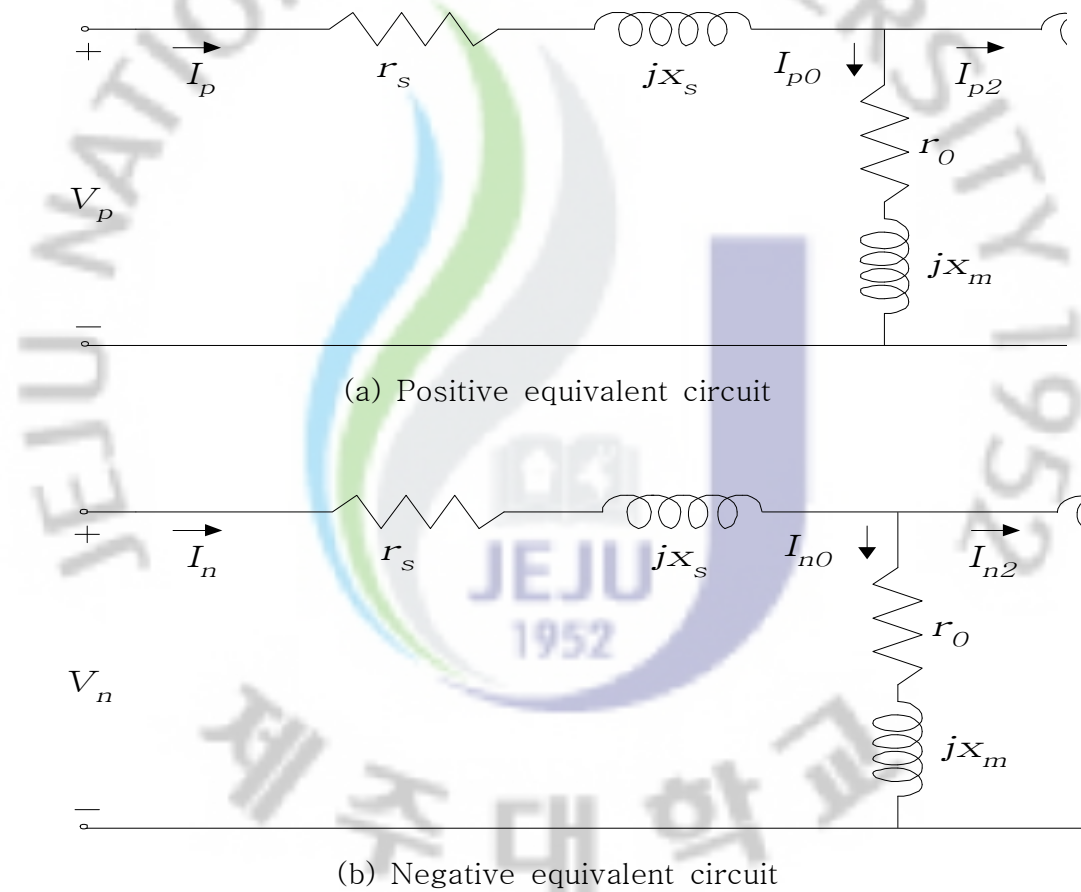


Fig. 4 Equivalent circuit models per phase considered no load loss

Fig. 4의 등가회로로부터 정상분 임피던스와 역상분 임피던스 계산은 앞 절의 단상결선 운전에서 있는 식(17), (18)로 구한다.

2) 스타인메츠결선에서의 운전

스타인메츠결선 단상운전에서 상전압과 상전류의 계산은 대칭성분 변환행렬 식을 이용하여 다음의 식(65), (66), (67), (68), (69), (70)으로 구한다.

$$V_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(V_p + V_n) \quad (65)$$

$$V_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2V_p + aV_n) \quad (66)$$

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(aV_p + a^2V_n) \quad (67)$$

$$I_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_p + I_n) \quad (68)$$

$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2I_p + aI_n) \quad (69)$$

$$I_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(aI_p + a^2I_n) \quad (70)$$

식(17), (18), (62), (63)으로부터 손실계산에 필요한 정상분전류와 역상분전류를, 그리고 Fig. 4의 등가회로로부터 2차권선의 정상분전류와 역상분전류를 구하면 다음의 식(71), (72), (73), (74)와 같다.

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} \quad (71)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (72)$$

$$I_{p2} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_p \quad (73)$$

$$I_{n2} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{2-s} + j(x_m + x_r)} I_n \quad (74)$$

식(71), (72)의 정상분전류와 역상분전류를 이용해서 1차 동손을 구하고, 식(73), (74)에 있는 2차 권선의 정상분전류와 역상분전류를 이용해서 2차 동손을 구하며, 1차 동손과 2차 동손의 합으로 총 동손을 구하면 다음과 같이 식(75), (76), (77)이 된다.

$$P_{c1} = (|I_p|^2 + |I_n|^2) r_s \quad (75)$$

$$P_{c2} = (|I_{p2}|^2 + |I_{n2}|^2) r_r \quad (76)$$

$$P_{ct} = P_{c1} + P_{c2} \quad (77)$$

무부하손실을 계산하기 위한 정상분 여자전류와 역상분 여자전류는 Fig. 4의 등가회로부터 전류분배 법칙에 의해 구하면 아래의 식(78), (79)로 나타낼 수 있다.

$$I_{pi} = \frac{\frac{r_r}{s} + jx_r}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_p \quad (78)$$

$$I_{ni} = \frac{\frac{r_r}{2-s} + jx_r}{r_0 + \frac{r_r}{2-s} + j(x_m + x_r)} I_n \quad (79)$$

앞에서 구해진 정상분 여자전류와 역상분 여자전류로부터 무부하손실의 계산은 식(80)으로 구하고, 총 동손과 무부하손실의 합으로 전기적인 총 손실의 계산은 아래의 식(81)로 구한다.

$$P_i = (|I_{pi}|^2 + |I_{ni}|^2) r_0 \quad (80)$$

$$P_{lt} = P_{ct} + P_i \quad (81)$$

2차권선의 정상분전류와 역상분전류인 식(73), (74)를 사용하여 토크 $\text{sync} \cdot W$, 2차 입력, 출력을 식(82), (83)으로 구하고, 효율 및 역률은 식(84), (85)로 구한다.

$$T = P_2 = \frac{r_r}{s} |I_{p2}|^2 - \frac{r_r}{(2-s)} |I_{n2}|^2 \quad (82)$$

$$P_m = P_2(1-s) \quad (83)$$

$$\eta = \frac{P_m}{\text{Re}(S_{inu})} \quad (84)$$

$$PF = \frac{\text{Re}(I)}{|I|} \quad (85)$$

여기서 $S_{inu} = VI^*$ 이다.

3. 모노사이클릭결선 운전

1) 모노사이클릭결선과 회로방정식

단상전원에 의해 운전되는 3상 유도전동기에서 전원이 접속되지 않은 나머지 두 상의 단자에 상변환기로 종류가 서로 다른 리액턴스 소자를 접속하여 운전하는 것을 모노사이클릭결선 단상운전이라 한다. 두 상의 단자에 접속되는 소자 중 저항소자는 전력손실 때문에 거의 사용하지 않고 리액턴스 소자로 커패시터와 리액터를 사용하고 있다.

Fig. 5는 전원이 접속된 상의 권선에 대하여 앞선 상에는 커패시터를, 뒤진 상에는 인덕터가 상변환기로 접속된 모노사이클릭결선의 고정자 결선도를 보이고 있다.

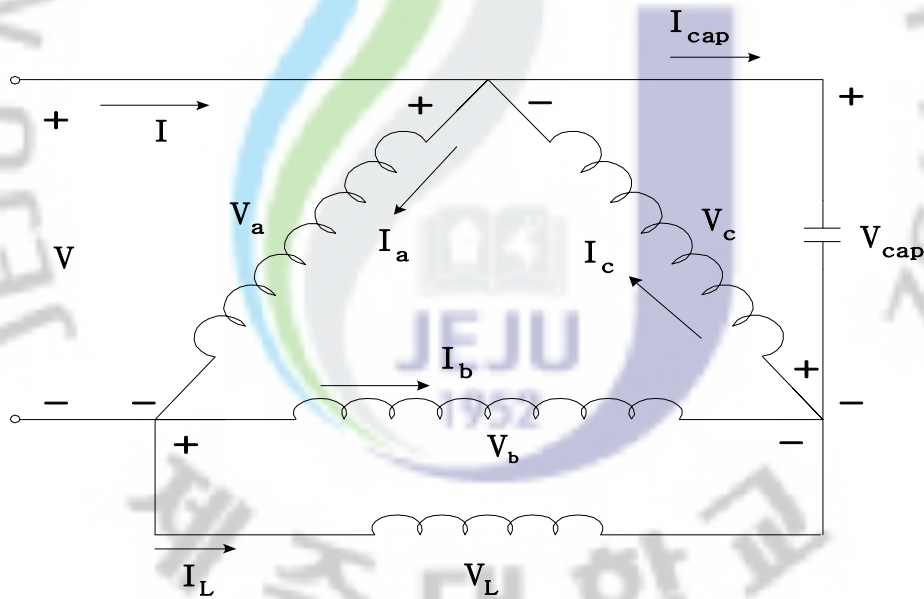


Fig. 5 Monocylic single-phase connection for three-phase induction motor

모노사이클릭결선된 유도전동기에 단상전원이 공급될 때 상 변환기를 적용한 특정속도 부분을 제외하고 상전압과 상전류는 불평형이 되므로 이들을 대칭성분으로 분해하여 해석하기 위해서 앞의 단상결선 운전에서 있는 식(1), (2), (3), (4)의 방법으로 전력불변 대칭성분 변환행렬을 사용하여 상변수와 대칭성분 변수를 취해

서 해석한다. 그리고 Fig. 5의 회로에서는 영상분전압이 0 이므로 영상분의 계산은 필요 없다.

이 회로를 해석하기 위하여 회로 방정식을 세우면 아래의 식(86), (87), (88), (89), (90)과 같다.

$$V = V_a \quad (86)$$

$$V_{cap} = -V_c = Z_{cap} I_{cap} \quad (87)$$

$$V_L = V_b = Z_L I_L \quad (88)$$

$$I_{cap} + I_L = I_c - I_b \quad (89)$$

$$I = I_{cap} + I_a - I_c \quad (90)$$

이 식들을 대칭분 전압식으로 변환하기 위하여 식(91), (92)의 관계를 사용한다.

$$V_p = Z_p I_p = (R_p + jX_p) I_p \quad (91)$$

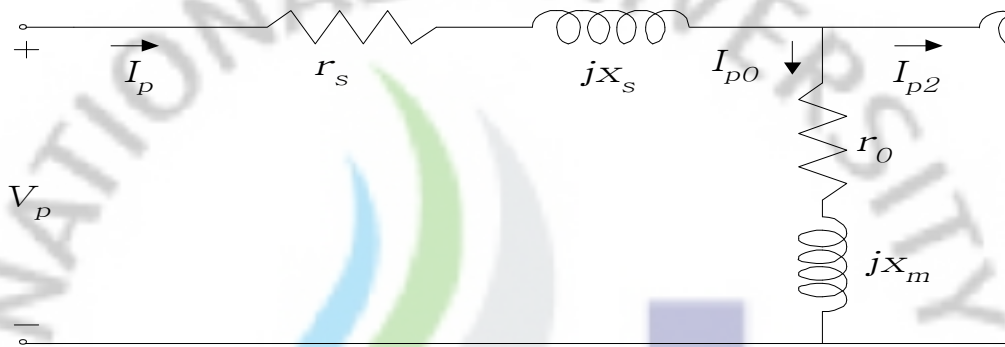
$$V_n = Z_n I_n = (R_n + jX_n) I_n \quad (92)$$

식(86)과 (89)를 대칭성분으로 변환해서 정상분전압과 역상분전압을 연립하여 구하면 식(93), (94)와 같이 된다. 아래의 식에서 $Z_{cap} = -jX_c$, $Z_L = jX_L$ 이다.

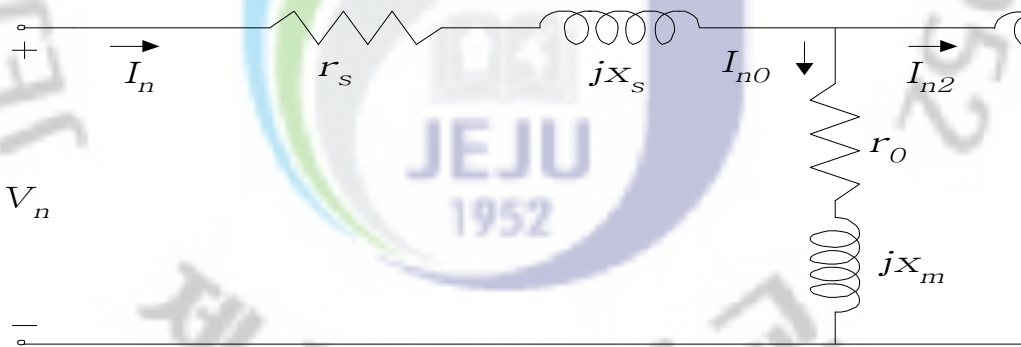
$$V_p = \frac{\sqrt{3} V \left(\frac{a-a^2}{Z_n} - \frac{a^2}{Z_{cap}} + \frac{a}{Z_L} \right)}{(a-a^2) \left(\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_n} + \frac{1}{Z_{cap}} + \frac{1}{Z_L} \right)} \quad (93)$$

$$V_n = \frac{\sqrt{3} V \left(\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{Z_{cap}} - \frac{a^2}{Z_L} \right)}{(a-a^2) \left(\frac{1}{Z_p} + \frac{1}{Z_n} + \frac{1}{Z_{cap}} + \frac{1}{Z_L} \right)} \quad (94)$$

무부하손실을 고려한 정상분과 역상분 등가회로를 도시하면 다음과 같이 나타낸다.



(a) Positive equivalent circuit



(b) Negative equivalent circuit

Fig. 6 Equivalent circuit models per phase considered no load loss

Fig. 6의 등가회로로부터 정상분 임피던스와 역상분 임피던스 계산은 앞 절의 단상결선 운전에 있는 식(17), (18)을 사용하여 구한다.

2) 모노사이클릭결선에서의 운전

모노사이클릭결선 단상운전에서 상전압과 상전류의 계산은 대칭성분 변환행렬식을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$V_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(V_p + V_n) \quad (95)$$

$$V_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2V_p + aV_n) \quad (96)$$

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(aV_p + a^2V_n) \quad (97)$$

$$I_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_p + I_n) \quad (98)$$

$$I_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(a^2I_p + aI_n) \quad (99)$$

$$I_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(aI_p + a^2I_n) \quad (100)$$

정상분전압과 역상분전압 그리고 정상분 임피던스와 역상분 임피던스로부터 손실계산에 필요한 정상분전류와 역상분전류를 식(101), (102)와 같이 구하고, Fig. 6의 등가회로로부터 2차권선의 정상분전류와 역상분전류를 구하면 다음의 식(103), (104)와 같이 된다.

$$I_p = \frac{V_p}{Z_p} \quad (101)$$

$$I_n = \frac{V_n}{Z_n} \quad (102)$$

$$I_{p2} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_p \quad (103)$$

$$I_{n2} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{2-s} + j(x_m + x_r)} I_n \quad (104)$$

식(101), (102)를 사용해서 1차 동손을 구하고, 식(103), (104)를 사용해서 2차 동손을 구하게 되면 식(105), (106)과 같이 나타낼 수 있고, 1차 동손과 2차 동손의 합으로 총 동손을 계산하면 아래의 식(107)과 같이 된다.

$$P_{c1} = (|I_p|^2 + |I_n|^2) r_s \quad (105)$$

$$P_{c2} = (|I_{p2}|^2 + |I_{n2}|^2) r_r \quad (106)$$

$$P_{ct} = P_{c1} + P_{c2} \quad (107)$$

무부하손실을 구하기 위한 정상분 여자전류와 역상분 여자전류의 계산은 Fig. 6의 등가회로부터 전류분배 법칙에 의해서 구하면 다음의 식(108), (109)와 같이 구성할 수 있다.

$$I_{pi} = \frac{\frac{r_r}{s} + jx_r}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_p \quad (108)$$

$$I_{ni} = \frac{\frac{r_r}{2-s} + jx_r}{r_0 + \frac{r_r}{2-s} + j(x_m + x_r)} I_n \quad (109)$$

앞에서 구해진 정상분 여자전류와 역상분 여자전류로부터 무부하손을 구하면 아래와 같이 식(110)이 되고, 총 동손과 무부하손의 합으로 전기적인 총 손실을 계산하면 식(111)이 된다.

$$P_i = (|I_{pi}|^2 + |I_{ni}|^2) r_0 \quad (110)$$

$$P_{lt} = P_{ct} + P_i \quad (111)$$

2차권선의 정상분전류와 역상분전류인 식(103), (104)를 사용하여 아래의 식(112), (113)과 같이 토크 $\text{sync} \cdot W$, 2차 입력, 출력을 구하고, 효율과 역률은 식(114), (115)로 구한다.

$$T = P_2 = \frac{r_r}{s} |I_{p2}|^2 - \frac{r_r}{(2-s)} |I_{n2}|^2 \quad (112)$$

$$P_m = P_2(1-s) \quad (113)$$

$$\eta = \frac{P_m}{\text{Re}(S_{inu})} \quad (114)$$

$$PF = \frac{\text{Re}(I)}{|I|} \quad (115)$$

여기서 $S_{inu} = VI^*$ 이다.

Ⅲ. 손실특성 및 상변환기 결정

본 장에서는 3상 평형운전일 때의 운전특성식과 등가회로를 제시하고, 3상 유도전동기를 단상전원에 의하여 운전했을 때의 손실특성을 해석하기 위해 각각의 손실비 등을 정의한다. 그리고 단상운전시 불평형 정도를 줄여 운전하기 위한 상변환기 리액턴스를 결정하는 방법 등을 살펴보고자 한다.

1. 3상 평형운전에서의 운전특성

앞의 제2장에서는 단상운전에서의 운전특성을 해석하기 위한 계산식들을 나타냈으나, 여기서는 측정에 의해 얻은 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 사용하여 3상 평형운전에서의 운전특성을 해석하기 위한 등가회로와 계산식들을 구성한다.

다음의 Fig. 7은 무부하손실을 고려한 3상 평형운전에서의 정상분 등가회로를 나타낸다.

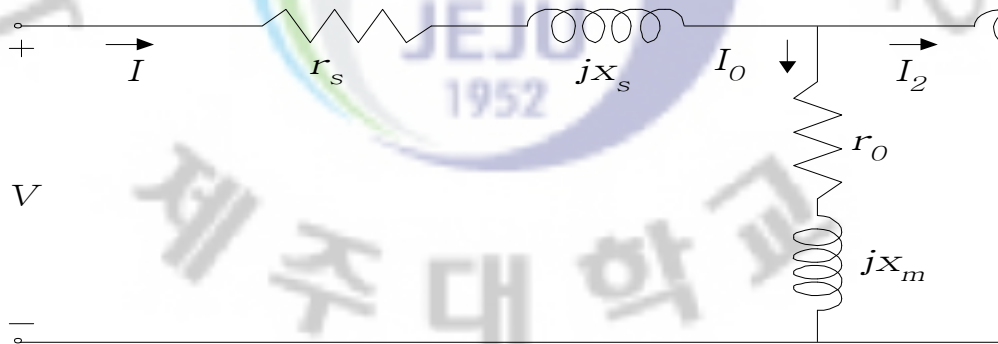


Fig. 7 Equivalent circuit per phase for balance operation

평형운전에서는 역상분은 없고 정상분만이 존재하므로 특성계산에 필요한 평형 입력 임피던스는 다음과 같이 정상분 임피던스와 같게 놓을 수가 있다.

$$Z_b = Z_p \quad (116)$$

$$Z_b = Z_p = r_s + jx_s + \frac{(r_0 + jx_m)\left(\frac{r_r}{s} + jx_r\right)}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} \quad (117)$$

위에서 구해진 평형 입력 임피던스로부터 입력전류와 2차 전류를 구하면 다음의 식(118), (119)와 같다.

$$I_b = \frac{V}{Z_b} \quad (118)$$

$$I_{2b} = \frac{r_0 + jx_m}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_b \quad (119)$$

식(118)을 이용해서 식(120)과 같이 1차 동손을, 식(119)를 이용해서 식(121)과 같이 2차 동손을 계산하며, 이들의 합으로 총 동손을 계산하면 아래의 식(122)와 같이 된다.

$$P_{c1b} = 3 (|I_b|)^2 r_s \quad (120)$$

$$P_{c2b} = 3 (|I_{2b}|)^2 r_r \quad (121)$$

$$P_{ctb} = P_{c1b} + P_{c2b} = 3 [(|I_b|)^2 r_s + (|I_{2b}|)^2 r_r] \quad (122)$$

무부하손실을 구하기 위한 여자전류를 계산하면 식(123)과 같다.

$$I_{ib} = \frac{\frac{r_r}{s} + jx_r}{r_0 + \frac{r_r}{s} + j(x_m + x_r)} I_b \quad (123)$$

앞에서 구한 여자전류로부터 식(124)와 같이 무부하손실을 구하고, 총 동손과 무부하손실의 합으로 전기적인 총 손실을 계산하면 다음의 식(125)가 된다.

$$P_{ib} = 3 (|I_{ib}|)^2 r_0 \quad (124)$$

$$P_{ltb} = P_{ctb} + P_{ib} \quad (125)$$

그리고 토크 $\text{sync} \cdot W$, 2차 입력, 출력, 효율, 역률 등은 다음의 식으로 구한다.

$$T_b = P_{2b} = 3 \frac{r_r}{s} |I_{2b}|^2 \quad (126)$$

$$P_{mb} = P_{2b}(1-s) \quad (127)$$

$$\eta_b = \frac{P_{mb}}{\text{Re}(S_{inb})} \quad (128)$$

$$PF_b = \frac{\text{Re}(I)}{|I|} \quad (129)$$

여기서 $S_{inb} = 3 VI^*$ 이다.

2. 출력감소율과 손실비

앞에서 구해진 단상결선 운전, 스타인메츠결선 운전 그리고 모노사이클릭결선 운전에서의 운전특성 관계식들로부터 단상운전시 출력특성과 손실특성을 분석하기 위해 3상 평형운전시 출력에 대한 단상운전시 출력의 비율로 출력감소율을, 3상 평형운전시 총 손실에 대한 단상운전시 총 손실의 비율로 손실비를 다음과 같이 정의한다.

$$\text{출력 감소율} = \frac{\text{단상운전시 출력}}{\text{3상 평형운전시 출력}} \quad (130)$$

$$\text{손실비} = \frac{\text{단상운전시 총 손실}}{\text{3상 평형운전시 총 손실}} \quad (131)$$

단상운전시 총 손실에 대해 무부하손비, 동손비, 고정자 동손비 그리고 회전자 동손비 등이 차지하는 비율을 다음과 같이 정의한다.

$$\text{무부하손비} = \frac{\text{단상운전시 무부하손}}{\text{단상운전시 총 손실}} \quad (132)$$

$$\text{동손비} = \frac{\text{단상운전시 총 동손}}{\text{단상운전시 총 손실}} \quad (133)$$

$$\text{고정자 동손비} = \frac{\text{단상운전시 고정자 동손}}{\text{단상운전시 총 손실}} \quad (134)$$

$$\text{회전자 동손비} = \frac{\text{단상운전시 회전자 동손}}{\text{단상운전시 총 손실}} \quad (135)$$

이와 같이 3상 평형운전시에 대한 단상운전시 비의 값으로 나타낸 출력감소율과 손실비, 그리고 단상운전시 총 손실에 대한 각각의 손실특성의 비로 정의한 관계식들을 사용해서 단상운전에 대한 특성 분석시에 전 슬립범위에 대하여 손실을 분석한다.

3. 상변환기 결정

1) 스타인메츠결선에서의 상변환기 커패시턴스 결정

스타인메츠결선 단상운전시 전압불평형 정도를 줄여 운전하기 위한 커패시터 상변환기의 커패시턴스 결정방법은 다음과 같다.

첫째의 방법으로 전압불평형률식인 식(64)를 이용해서 전 슬립에 대하여

$$\frac{d}{dX_c} \left(\frac{|V_n|}{|V_p|} \right) = 0 \quad (136)$$

의 조건을 만족하는 X_c 를 구한다.

둘째의 방법으로 식(63)을 이용하는 것으로 전 슬립에 대하여

$$\frac{d}{dX_c} (|V_n|) = 0 \quad (137)$$

의 조건을 만족하는 X_c 를 구한다.

위의 방법에 의하여 얻은 모든 슬립에서 변화하는 X_c 를 사용한 운전이 현실적으로 불가능하므로 보통 기동시와 정격운전속도에서의 X_c 를 사용하고 있다.

셋째의 방법으로 식(63) 또는 식(64)를 이용하는 것으로

$$VUF=0 \quad (138)$$

또는

$$V_n=0 \quad (139)$$

의 조건을 만족하는 슬립과 X_c 를 구한다.

여기에서 첫째 방법과 둘째 방법은 각각 임의의 원하는 슬립에서 최소 전압불평형을 조건과 최소 역상분전압 조건에 의해서 X_c 를 구하는 방법으로 그 값이 서로 비슷하다. 셋째 방법은 전압불평형률이 0이 만족되는 조건에 의해 슬립과 X_c 를 구하므로 임의의 원하는 슬립에 대해서 X_c 를 구할 수 없다.

따라서 본 논문에서 단상운전시 불평형 정도를 줄여 운전하기 위해 사용된 상변환기 커패시턴스 결정방법은 임의의 원하는 슬립에서 X_c 를 구할 수 있는 첫째 또는 둘째 방법 중 첫째 방법인 최소 전압불평형률 조건을 이용하여 상변환기 커패시턴스를 구한다.



2) 모노사이클릭결선에서의 상변환기 리액턴스 결정

모노사이클릭결선 단상운전에서 전압불평형률을 줄여 운전하기 위한 상변환기 리액턴스의 결정방법으로 다음과 같은 방법 등이 있다.

앞 절에서 구해진 식(93), (94)인 정상분전압과 역상분전압을 이용해서 IEC (International Electrotechnical Commission) 규정에 의한 전압불평형률은 다음의 식(140)과 같이 주어진다.

$$VUF = \frac{|V_n|}{|V_p|} \quad (140)$$

따라서 전동기를 평형상태로 운전하기 위해서는 $VUF=0$ 이 되어야 한다. 즉, 이것은 $V_n=0$ 이 되어야 함을 의미하므로 식(94)로부터 아래의 식(141)이 된다.

$$\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{Z_{cap}} - \frac{a^2}{Z_L} = 0 \quad (141)$$

이 식에서 $Z_{cap} = -jX_c$, $Z_L = jX_L$ 을 대입하여 첫째 방법으로써 다음의 상변환기 리액턴스를 구한다.

$$X_c = \frac{R_p^2 + X_p^2}{\sqrt{3} R_p^2 + X_p^2} \quad (142)$$

$$X_L = \frac{R_p^2 + X_p^2}{\sqrt{3} R_p^2 - X_p^2} \quad (143)$$

둘째 방법으로 임의의 슬립에서 식(141)을 만족하는 X_c 와 X_L 을 구한다. 식(141)은 복소수함수의 미지수로 X_c 와 X_L 을 포함하므로 실수부와 허수부로 분리하여

각각 0으로 놓은 두 식을 연립방정식으로 구성하면 다음의 식(144), (145)와 같이 된다.

$$\operatorname{Re}\left(\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L}\right) = 0 \quad (144)$$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L}\right) = 0 \quad (145)$$

이 두 식을 응용 소프트웨어에서 경험에 의해 선택한 초기값을 사용하여 X_c 와 X_L 을 구한다.

셋째 방법으로 임의의 슬립에서 식(141)의 크기가 0이 되는 조건식과 이 식을 X_c 에 대하여 최소가 되는 연립방정식을 구성하면 아래의 식(146), (147)이 된다.

$$\left| \frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L} \right| = 0 \quad (146)$$

$$\frac{d}{dX_c} \left| \frac{a-a^2}{Z_p} + \frac{a}{-jX_c} - \frac{a^2}{jX_L} \right| = 0 \quad (147)$$

이 두 식을 응용 소프트웨어에서 경험에 의한 초기값을 사용하여 X_c 와 X_L 을 구한다.

이상에서와 같이 상변환기 리액턴스를 결정하는 방법 중 첫째 방법은 정상분 임피던스의 저항과 리액턴스 성분을 계산하기 위하여 대수계산이 필요하다. 그러므로 본 논문에서는 대수계산 없이 임의의 슬립에서 응용 소프트웨어를 이용한 초기값을 사용해서 식(141)을 만족하는 X_c 와 X_L 을 쉽게 구할 수 있는 둘째 방법과 셋째 방법의 사용을 제안한다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

운전특성 분석에 사용된 전동기는 Lab Volt 사의 정격전압 120/208V, 전류 1.3A, 출력 175W, 주파수 60Hz, 회전수 1500rpm인 4극의 3상 권선형 유도전동기이다.

이 전동기의 등가회로 정수로 제작회사에서 제공한 무부하손실이 반영되지 않은 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 권장 T형 등가회로 정수와 측정에 의해서 얻은 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수[21]를 Table 1에 정리한다.

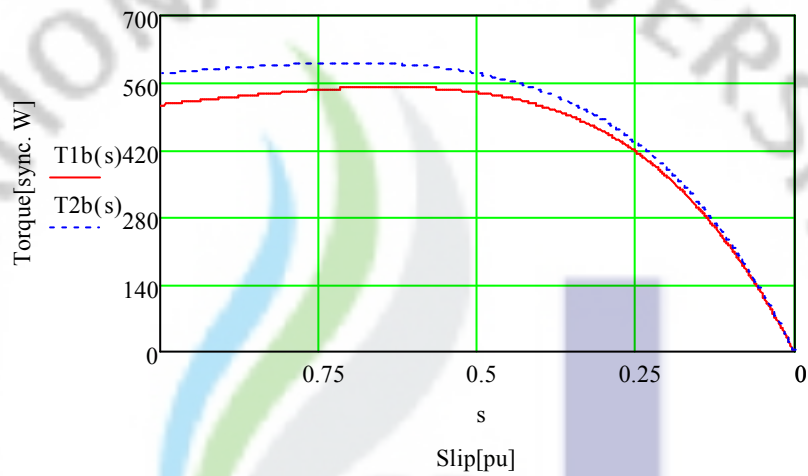
본 논문에서는 무부하손실을 고려한 T형 등가회로 정수를 사용하여 단상결선, 스타인메츠결선, 모노사이클릭결선의 단상운전에 대해 기동에서부터 동기 속도까지 전 운전범위에서 각각의 운전특성들에 대해 슬립에 따른 운전특성 변화를 분석한 후 평형운전시 운전특성과 비교한다. 그리고 제작회사에서 제공한 IEEE 권장 T형 등가회로 정수와 측정에 의해 구한 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 사용하여 3상 평형운전에서의 토크특성을 비교하고, 그 토크차이를 전 운전범위에 대해 시뮬레이션하여 특성곡선으로 보였다. 이하의 특성곡선에서 특성을 표시하는 첨자 s 는 기동시를, r 은 정격운전시를 나타내고, b 는 평형운전을, u 는 단상운전을 각각 나타낸다.

Table 1 Equivalent circuit parameters

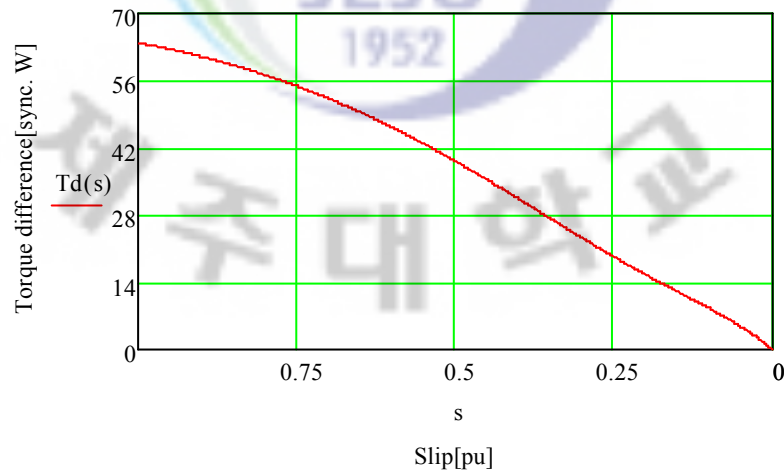
Parameter[Ω] Data	r_s	X_s	r_r	X_r	r_0	X_m
	Manufacturer's	12.5	8.8	14.9	8.8	-
Measured	12.07	10.17	14.82	10.59	5.92	142.56

1. 등가회로 정수에 의한 토크특성

Table 1에 있는 두 개의 등가회로 정수를 사용하여 3상 평형운전시의 토크특성과 두 정수에 의한 토크 차의 속도에 따른 변화를 Fig. 8에 보였고, Fig. 8 (a)에서 T_{1b} 와 T_{2b} 는 각각 측정정수와 제작회사에서 제공한 정수에 의한 토크이며, (b)에서 T_d 는 T_{1b} 와 T_{2b} 의 토크차를 나타낸다.



(a) Torque characteristics computed by measured and manufacturer's data



(b) Torque difference from Fig. 8 (a)

Fig. 8 Speed-torque characteristics under three-phase balance operation

Fig. 8 (a)에서 기동시에 T_{1b} 는 513.50 sync · W, T_{2b} 는 577.39 sync · W로써 T_{1b} 와 T_{2b} 가 최대 63.89 sync · W의 토크차이가 있다. 따라서 손실에 대한 정확한 분석을 위해서는 특성계산에 직접 반영될 수 있는 무부하손실을 고려한 T형 등가회로 정수를 사용하는 것이 바람직하므로 본 논문에서는 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 사용한다.

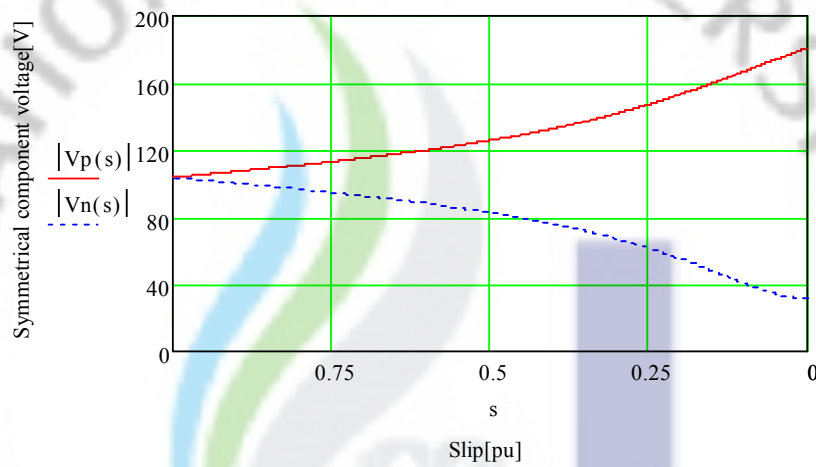


2. 단상결선 운전

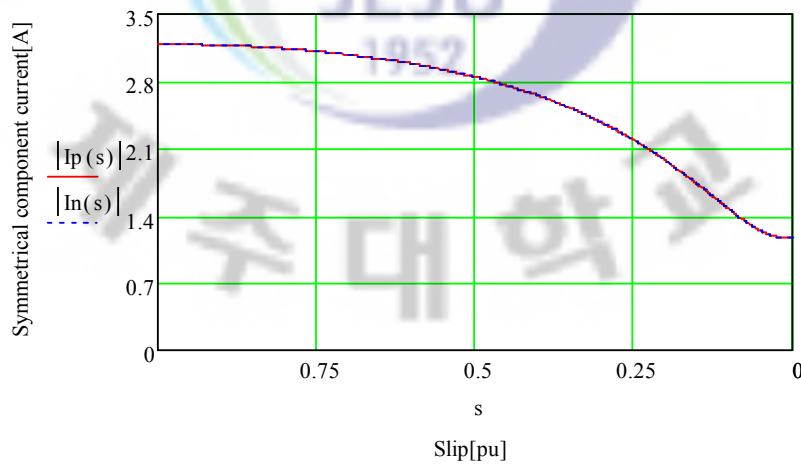
단상결선의 운전특성을 분석하기 위하여 Table 1에 제시된 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 적용하여 기동시부터 동기속도까지의 전 운전범위에 대해 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 단상결선 운전특성을 전반적으로 분석한다.

1) 운전특성

㉠ 대칭분전압과 전류



(a) Symmetrical component voltages



(b) Symmetrical component currents

Fig. 9 Symmetrical component voltages and currents

Fig. 9는 속도에 따른 대칭분전압과 전류의 변화를 나타내고 있다. (a)의 대칭분전압 곡선에서 정상분전압과 역상분전압은 기동시 모두 103.92V로 같으며 속도증가에 따라 동기속도에서 정상분전압은 180.63V로 증가하고, 역상분전압은 정상분전압과 반대로 32.25V로 감소하여 서로 대칭의 상반된 변화를 보이고 있다. 이것은 속도증가에 따라 정상분 임피던스는 증가하고, 역상분 임피던스는 일정하기 때문에 이에 비례하여 정상분전압은 증가하고 역상분전압은 감소함을 보여주고 있다.

(b)의 대칭분전류 곡선에서 기동시 정상분전류와 역상분전류는 모두 3.19A이고, 정격속도에서 정상분전류와 역상분전류 또한 같은 1.82A를 보이고 있다. 기동에서 동기속도까지 전 운전범위에 대해 정상분전류와 역상분전류 값이 일치하고 있는데, 이것은 속도변화에 따른 대칭분 임피던스와 대칭분전압의 비율로 대칭분전류가 되기 때문에 같은 특성을 보이고 있다.

㉔ 전압불평형률

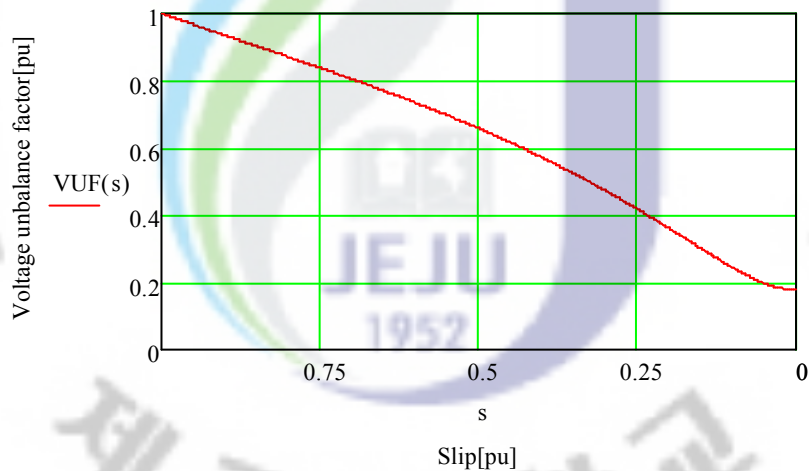


Fig. 10 Variation of voltage unbalance factor

Fig. 10은 속도에 따른 전압불평형률의 변화를 나타내고 있는 곡선으로 기동시 1.0pu에서 동기속도시 0.18pu까지 속도증가에 따라 감소하고 있다. 단상결선 운전에서 기동시 전압불평형률은 1.0pu로 전압불평형률이 매우 큼을 알 수 있는데, 기동시 정상분 회전력과 역상분 회전력이 동일하게 작용하여 기동토크가 발생하지 못함을 의미한다. 이것은 앞의 대칭분전압 곡선에서 속도가 증가함에 따라 정

상분전압은 증가하고 역상분전압은 감소해서 그 비율인 전압불평형률이 속도증가에 따라 감소하고 있다.

㉔ 전류불평형률

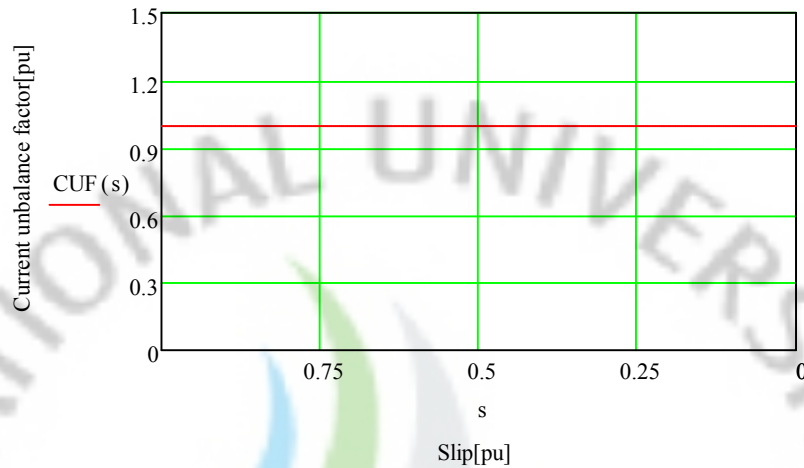
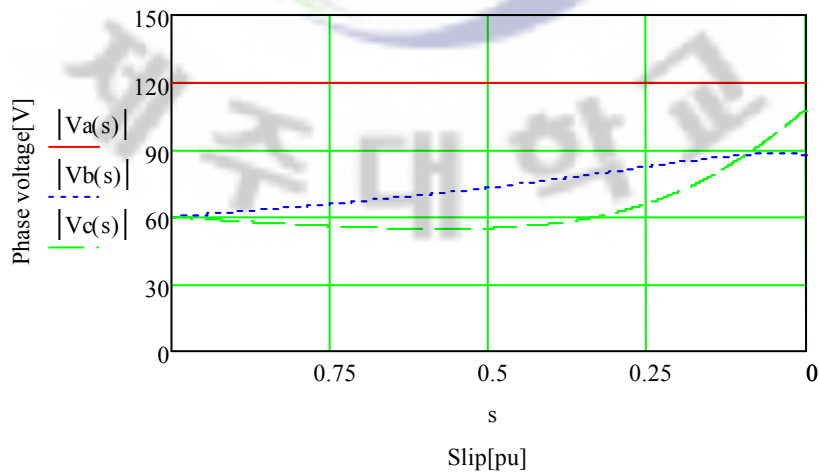


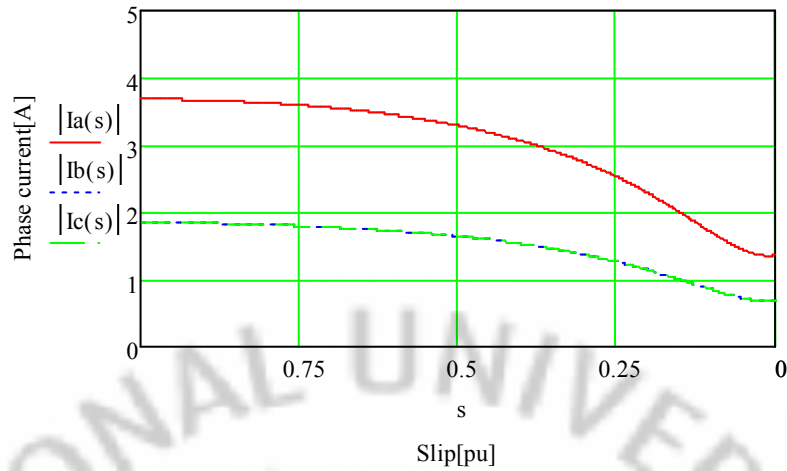
Fig. 11 Variation of current unbalance factor

Fig. 11은 속도에 따른 전류불평형률의 변화를 나타내고 있으며, 기동에서 동기 속도까지 1pu로 일정한 값을 보인다. 그 이유는 앞의 대칭분전류 곡선에서 속도증가에 따라 어떤 슬립에서도 정상분전류와 역상분전류 값이 일치하기 때문에 그 비율인 전류불평형률 또한 속도가 증가하더라도 일정한 1pu 값을 보이고 있다.

㉕ 상전압과 상전류



(a) Phase voltages



(b) Phase currents

Fig. 12 Variation of phase voltages and currents

Fig. 12는 단상결선 운전에서 속도에 따른 상전압과 상전류의 변화를 보이고 있는데, (a)의 상전압 곡선에서 a상 전압은 기동시부터 동기속도까지 단자전압 120V로 일정하게 유지되고 있다. 그리고 b상과 c상 전압은 기동시 모두 60V이고 속도 증가에 따라 b상은 위로 불록하게, c상은 아래로 불록한 변화를 보이고 있으며 $s=0.094pu$ 에서 87.67V로 b상과 c상 전압은 같아지고 있다. 그리고 전원이 접속되지 않은 b상과 c상 전압은 어떤 슬립에서도 단자전압 120V보다는 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

(b)의 상전류 곡선에서 a상 전류는 기동시 3.68A에서 동기속도시 1.36A로 속도 증가에 따라 점차적으로 완만하게 감소하지만 슬립 $s=0.2pu$ 이하의 속도에서는 대체로 급격하게 감소하는 특성을 나타낸다. b상과 c상 전류는 기동에서부터 동기속도까지 전 슬립범위에서 동일한 감소특성을 나타내고 있는데 기동시와 동기속도시 각각 1.84A, 0.68A로 속도 증가에 따라 완만하게 감소하는 특성을 보이고 있다.

이상의 상전압과 상전류 곡선에서 알 수 있는 것은 결상으로 인해 전압불평형과 전류불평형이 발생되고 있으며, 이러한 전압과 전류불평형의 발생은 역상분전압과 역상분전류의 발생을 의미하므로 토크와 출력 그리고 그 밖의 운전특성 등에 많은 영향을 초래한다.

㉔ 역률특성

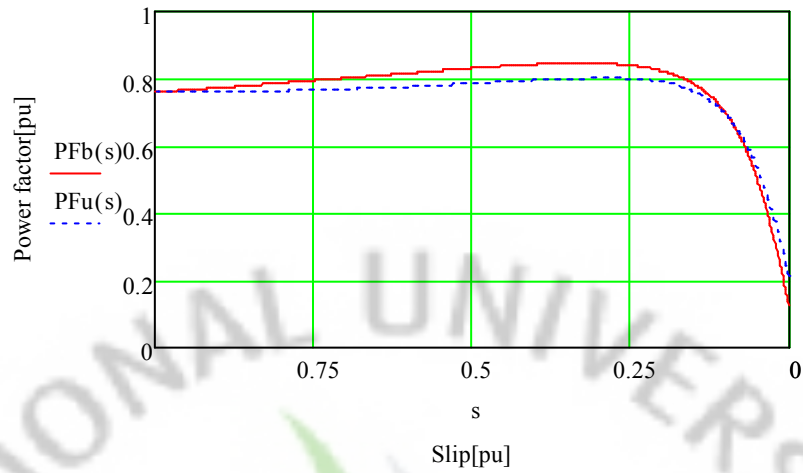


Fig. 13 Power factor characteristics

Fig. 13은 속도변화에 따른 역률특성을 보이고 있으며, 평형운전과 단상운전에서 기동시 역률은 0.76pu로 같고 평형운전시 최대역률은 $s=0.35pu$ 에서 0.85pu이고, 단상운전시 최대역률은 $s=0.30pu$ 에서 0.80pu를 보이고 있다. 평형운전시와 단상운전시 역률의 최대차이가 0.045pu로써 평형운전과 단상운전의 역률특성이 전 운전범위에서 비슷한 특성을 나타내고 있다.

㉕ 토크특성

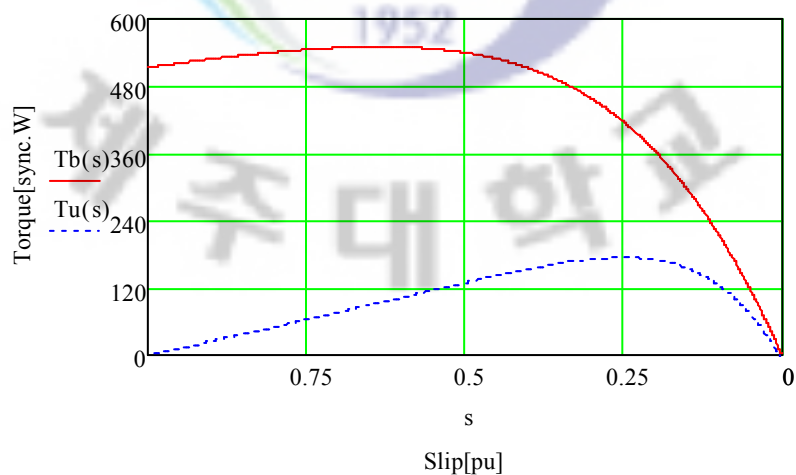


Fig. 14 Torque characteristics

Fig. 14는 토크특성을 보이고 있는데 단상운전일 때 기동토크는 0 sync ·W, s=0.25pu에서 최대토크 174.20 sync ·W를 나타내고 있으며, 평형운전일 때 기동토크는 513.50 sync ·W, s=0.64pu에서 최대토크 550.56 sync ·W를 나타내고 있다. 이 토크곡선에서 알 수 있듯이 평형운전에서는 충분한 기동토크를 얻어서 스스로 기동할 수 있지만, 단상결선의 결상운전에서 기동할 때 기동토크는 0 sync ·W로 기동토크가 전혀 없어 전동기가 스스로 기동할 수 없음을 보여주고 있다. 기동토크 특성은 전동기 특성 중에서도 매우 중요한 것으로 기동토크가 없다는 것은 단독으로 운전할 수 없음을 의미한다. 또한, 운전토크도 마찬가지로 평형운전과 비교해보면 매우 낮게 나타나고 있다.

㉞ 출력특성

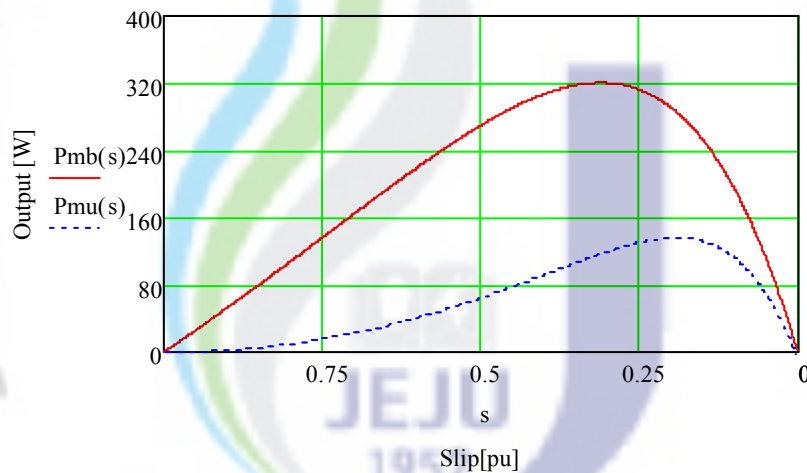


Fig. 15 Output characteristics

Fig. 15는 출력특성을 보이고 있고, 평형운전일 때 기동시 0pu, s=0.31pu에서 최대출력 320.40W를 나타내고 있으며, 단상운전일 때 기동시 0W, s=0.19pu에서 최대출력 136.15W를 나타내고 있다. 정격운전속도에서의 출력을 보더라도 평형운전과 단상운전에서 각각 267.94W, 133.55W로 단상운전에서의 출력이 평형운전 출력의 절반에도 미치지 못하고 있고, 전반적으로 전 운전범위에 있어서 평형운전에 비해 매우 낮은 출력특성을 나타내고 있다.

◎ 효율특성

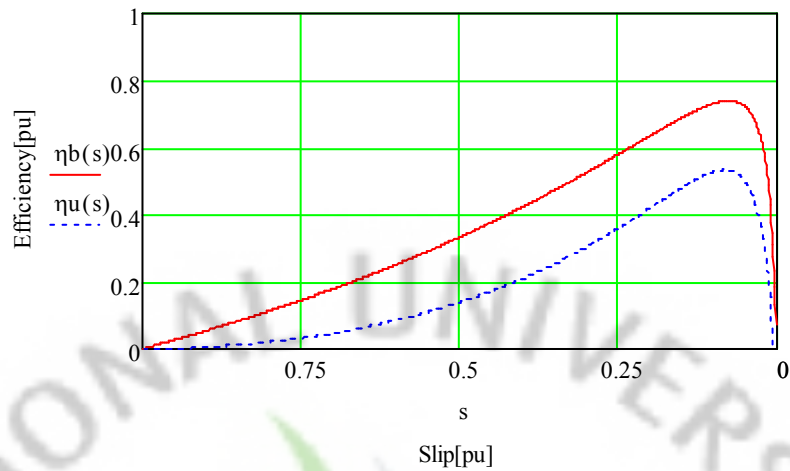
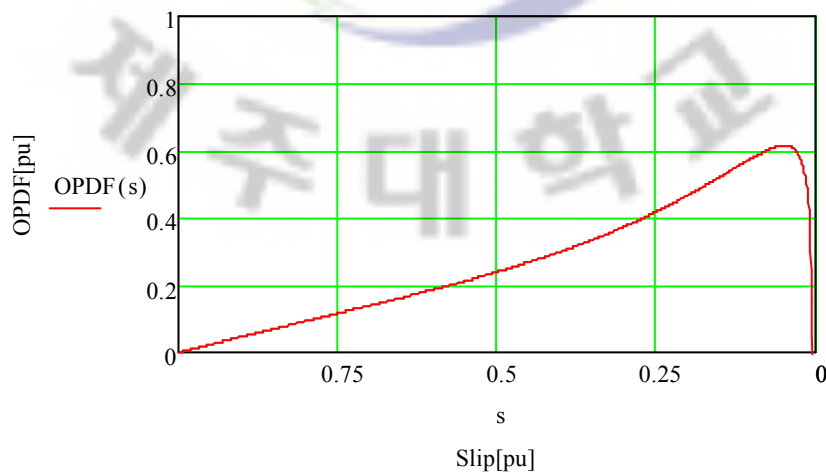


Fig. 16 Efficiency characteristics

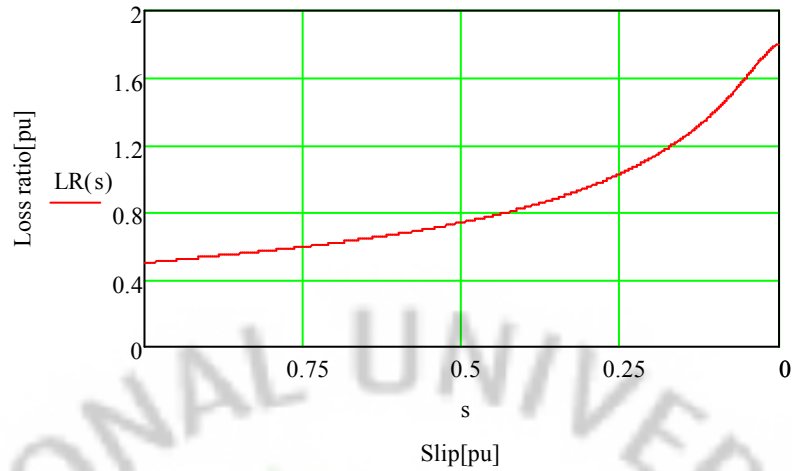
Fig. 16은 효율특성을 나타내고 있으며 평형운전일 때 기동시 0pu이고, $s=0.076pu$ 에서 최대효율 0.74pu, 단상운전일 때 기동시 0pu, $s=0.083pu$ 에서 최대효율 0.53pu를 나타내고 있다. 단상결선 운전에서는 효율특성이 평형운전시보다 전 운전범위에서 대체로 낮고 효율의 최대차이가 $s=0.3pu$ 부근에서 0.32pu 낮음을 보이고 있다.

2) 출력감소율과 손실특성

㉠ 출력감소율과 손실비



(a) Output power decrease factor



(b) Loss ratio

Fig. 17 Variation of output power decrease factor and loss ratio

Fig. 17은 출력감소율과 손실비의 변화를 보이고 있다. (a)의 출력감소율은 평형 운전시 출력 대비 단상운전시의 출력을 나타내는 특성곡선으로서 그림을 보면 기동시부터 동기속도까지 속도증가에 비례하여 출력감소율은 증가하고 있다. 출력감소율의 최대값은 $s=0.049pu$ 에서 $0.61pu$ 를 나타내고 있으며 그 이상의 속도에서는 오히려 더욱 감소하고 있다. 또한, 정격운전속도인 $s=0.167pu$ 에서 출력감소율은 $0.50pu$ 로 단상운전시의 출력이 평형운전시 출력에 비해 정확히 50% 밖에 미치지 못함을 알 수 있다. 이것은 단상운전시 출력특성이 평형운전시 출력특성에 비해 전 운전범위에서 매우 낮음을 보여주고 있다.

(b)는 손실비 특성을 나타내고 있다. 3상 평형운전시 총 손실에 대한 단상운전시 총 손실의 비인 손실비 곡선에서 기동시 $0.50pu$ 로부터 동기속도시 $1.80pu$ 까지 속도증가에 따라 지속적으로 증가하고 있고, 정격속도인 $s=0.167pu$ 에서 손실비는 $1.20pu$ 의 값을 보이고 있다. 손실비는 $s=0.27pu$ 를 기준으로 단상운전시 손실은 저속에서는 감소하여 평형운전시 손실보다는 작지만 그 이상 속도가 증가할수록 손실도 같이 증가하여 평형운전시 손실보다 커지고 있다. 그리고 정격속도 이상의 고속에서는 손실비도 다른 슬립구간에서의 손실변화율 보다 급격히 증가하는 특성을 보이고 있다.

㉔ 동손비와 무부하손비

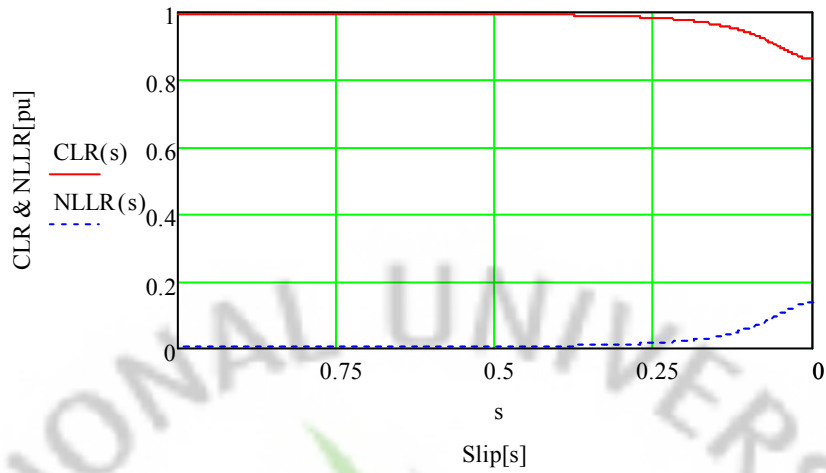


Fig. 18 Variation of no load loss and copper loss ratio

Fig. 18은 동손비와 무부하손비의 변화를 보이고 있다. 동손비는 기동시 1.0pu에서 정격속도시 0.95pu로 저속에서는 높고 정격속도 이상의 고속에서는 감소하고 있다. 무부하손비는 기동시 0pu에서 정격속도시 0.05pu로 저속에서는 낮고 정격속도 이상의 고속에서는 증가하고 있는데, 속도증가에 따라 동손비와 무부하손비는 서로 상반된 변화특성을 보이고 있다. 여기서 동손비는 동기속도에 가까울수록 2차 전류가 감소하기 때문에 낮아지고, 무부하손비는 속도가 증가할수록 기계손, 표유부하손 등이 증가하기 때문에 손실도 증가한다.

㉕ 고정자 동손비와 회전자 동손비

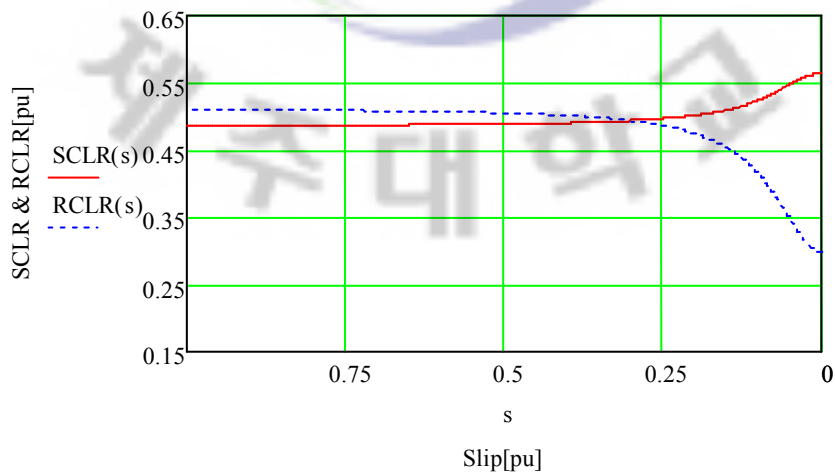


Fig. 19 Variation of stator copper loss and rotor copper loss ratio

Fig. 19는 고정자 동손비와 회전자 동손비의 변화를 보이고 있으며, 고정자 동손비는 기동시 0.49pu에서 정격속도시 0.52pu이다. 회전자 동손비는 기동시 0.49pu에서 정격속도시 0.43pu로써 고정자 동손비는 저속에서 낮고 정격속도 이상의 고속에서는 증가하고 있다. 반대로 회전자 동손비는 저속에서 높고 정격속도 이상의 고속에서는 감소하는 특성을 보이고 있다. 기동에서부터 정격운전속도 부근까지의 고정자 동손비와 회전자 동손비는 각각 0.5pu 정도의 값을 보이고 동기속도 부근에서는 고정자 동손비가 증가한 값보다 회전자 동손비가 감소한 값이 더 크기 때문에 Fig. 18의 단상운전시 동손비 곡선에서 알 수 있듯이 동기속도 부근에서 감소하는 값이 나타난다.



3. 스타인메츠결선 운전

측정에 의해서 얻은 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 갖는 3상 유도전동기가 단상전원에 접속되어 단상운전할 경우 앞의 제3장에서 전압불평형을 줄여 운전하기 위한 상변환기 커패시턴스 계산식에 의해 계산된 상변환기 커패시턴스의 세 가지 결정방법에 따른 계산결과를 Table 2에 보인다. 앞의 제3장에 있는 스타인메츠결선에서의 커패시턴스 결정방법에서도 언급되었지만 방법1, 방법2, 방법3은 각각 최소 전압불평형을 조건, 최소 역상분전압 조건, 전압불평형률이 영이 되는 조건을 이용한 상변환기 커패시턴스와 용량성 리액턴스를 구한 결과 값이다.

Table 2 Computed results of capacitance with three methods

Method Slip[pu]	$X_c[\Omega]$	1	2	3
	$C[\mu F]$			
1	$X_c[\Omega]$	18.821	19.338	80.342
	$C[\mu F]$	140.937	139.169	33.016
0.167	$X_c[\Omega]$	54.389	9.346	slip=0.0508
	$C[\mu F]$	48.770	283.820	

본 논문에서는 위의 세 가지 커패시터 상변환기의 커패시턴스 결정방법 중 임의의 원하는 슬립에서 X_c 를 구할 수 있는 방법으로는 첫째 방법과 둘째 방법이 있는데, 여기서는 첫째 방법인 최소 전압불평형을 조건에 의해 구해진 용량성 리액턴스를 상변환기 값으로 사용해서 특성분석에 적용한다.

특성을 분석하기 위해 앞의 Table 1에서 제시된 측정에 의해 얻은 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 적용하여 상변환기로 사용한 커패시터의 용량성 리액턴스인 X_c 값을 기동시와 정격운전속도에서 최소 전압불평형을 조건으로 응용 소프트웨어(Mathcad)에 의해 초기값 ($X_c = 15\Omega$)을 사용하여 각각 구한다. 그리고 이 값을 사용해서 기동용 커패시터는 기동시(s=1)에 적용하고, 운전용 커패

시터는 기동시 구한 전압불평형률 곡선과 운전시 구한 전압불평형률 곡선이 교차하는 슬립인 $s=0.45pu$ 에서 기동용 커패시터와 교체 적용하여 특성을 해석한다. 다음의 Table 3은 스타인메츠결선 운전에서 사용된 상변환기의 용량성 리액턴스와 커패시턴스를 보인다.

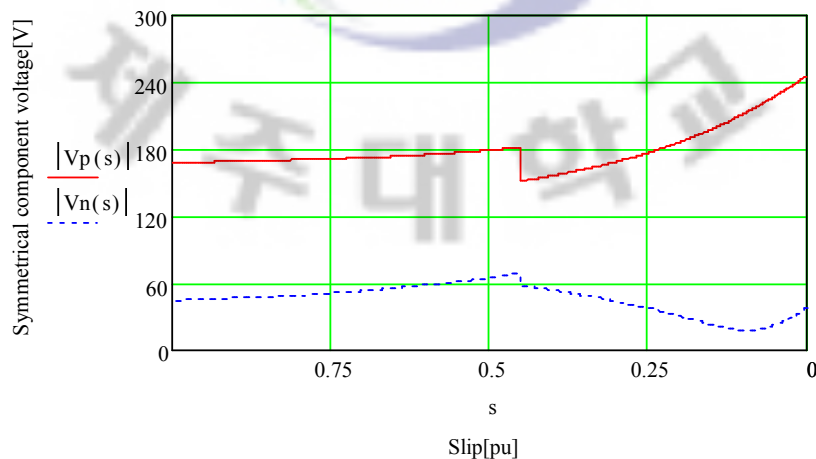
Table 3 X_c and C computed by condition of minimum voltage unbalance factor

Slip[pu] \ X_c, C	$s=1$ (at starting)	$s=0.167$ (at rated speed)
$X_c[\Omega]$	18.821	54.389
$C[\mu F]$	141.008	48.794

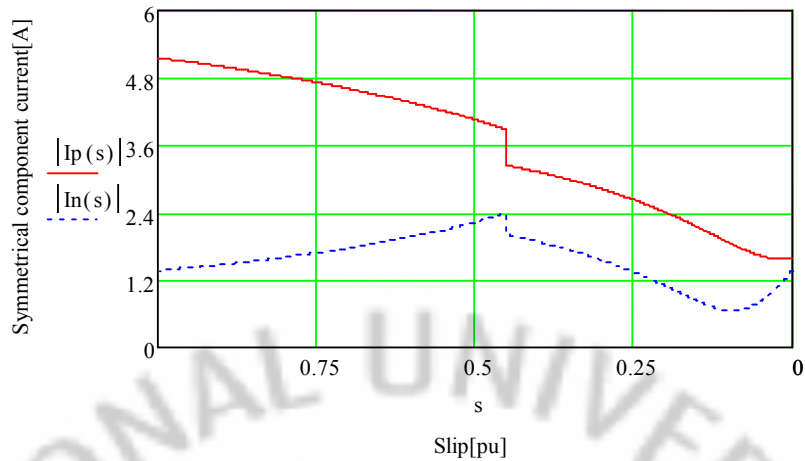
Table 1의 측정에 의해 얻은 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수와 Table 3의 기동과 정격운전속도에서 각각 구한 상변환기의 용량성 리액턴스인 X_c 값을 적용하여 3상 유도전동기에 단상전원을 인가하였을 때의 제반 운전특성을 분석한다.

1) 운전특성

㉠ 대칭분전압과 전류



(a) Symmetrical component voltages



(b) Symmetrical component currents

Fig. 20 Symmetrical component voltages and currents

Fig. 20은 대칭분전압과 전류를 보이고 있으며, (a)의 대칭분전압 곡선에서 정상분전압은 기동시 168.0V에서 상변환기 교체 슬립점인 $s=0.45pu$ 까지 거의 일정한 값을 유지하다가 상변환기 교체 이후부터 동기속도까지 계속적으로 상승하고 있다. 역상분전압은 기동시에 44.50V이고, 상변환기 교체 슬립점인 $s=0.45pu$ 에서 68.42V로 최고의 역상분전압을 보이고 있으며, 전체적으로 기동에서부터 상변환기 교체하기 전에는 완만하게 상승하는 것이 보이나 상변환기 교체 이후의 속도에서 정격운전속도까지는 반대로 감소하는 대칭분전압 특성을 보이고 있다. 대칭분전압은 대칭분 임피던스 값에 비례하므로 대칭분 임피던스가 증가하면 대칭분 전압도 증가하고, 대칭분 임피던스가 감소하면 대칭분전압도 감소하는 특성이 나타나게 된다. 정상분전압이 역상분전압보다 크기 때문에 앞에서의 단상결선 운전에서보다 전압불평형률이 작다.

(b)의 대칭분전류 곡선에서 정상분전류는 기동시 5.16A에서 동기속도시 1.60A까지 속도에 따라 전반적으로 감소하고 있다. 역상분전류는 기동시 1.37A에서부터 상변환기 교체 슬립점의 역상분전류 값인 2.38A까지 약 1A 정도 상승하지만 상변환기 교체 이후부터 슬립 $s=0.1pu$ 까지는 반대로 감소하고 있다. 대칭분전류는 대칭분전압과 대칭분 임피던스 값에 대한 비율로써 나타낸다.

㉔ 전압불평형률

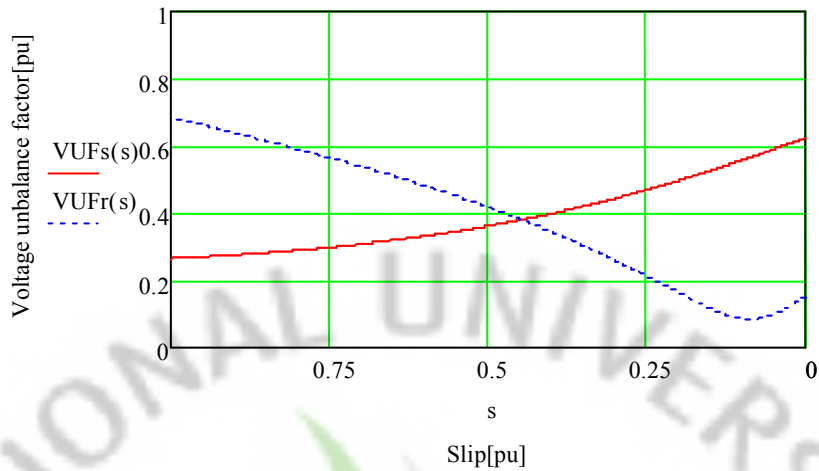


Fig. 21 Variation of voltage unbalance factors

Fig. 21은 전압불평형률의 변화로 기동용 X_c 적용에 의한 VUF_s 와 운전용 X_c 적용에 의한 VUF_r 이 슬립에 따른 변화를 보이고 있다. 이 곡선에서 슬립 0.45pu에서 두 곡선이 교차하고 있으며 그 교차점에서 전압불평형률이 0.38pu이므로 이 슬립에서 운전용 커패시터를 교체하여 운전함으로써 교차점에서의 전압불평형률 값 이하로 전 운전범위에서 운전할 수 있음을 의미한다.

㉕ 전류불평형률

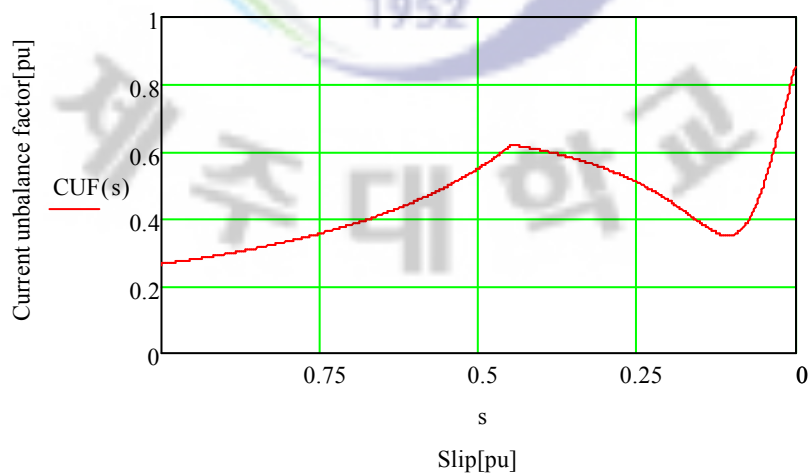
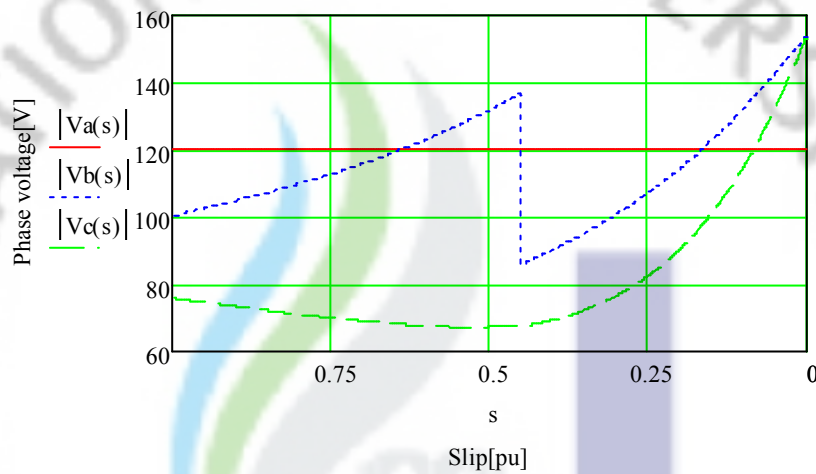


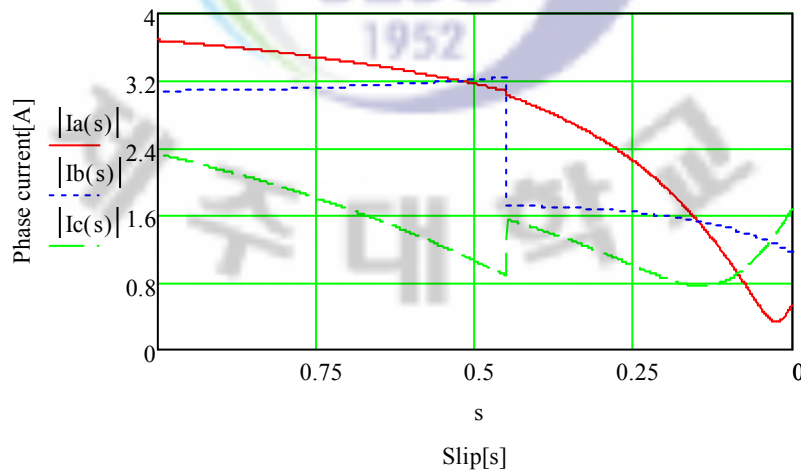
Fig. 22 Variation of current unbalance factor

Fig. 22는 속도 증가에 따른 전류불평형률의 변화를 나타내고 있다. 기동시 0.26pu의 전류불평형률을 나타내고 있으며, 운전용 상변환기 교체 슬립인 0.45pu에서 0.62pu로 최대 전류불평형률을 보이고 있다. 하지만 속도가 증가하여 슬립 0.11pu에서 전류불평형률이 0.35pu로 기동시 다음으로 낮은 전류 불평형률을 나타내고 있다. 전류불평형률은 Fig. 20의 대칭분전류 곡선에서 정상분전류와 역상분전류의 비율로 나타낸다.

㉔ 상전압과 상전류



(a) Phase voltages



(b) Phase currents

Fig. 23 Variation of phase voltages and currents

Fig. 23은 상전압과 상전류의 변화를 나타내고 있다. (a)의 상전압 곡선에서 a상 전압은 120V로 기동에서 동기속도까지 일정하게 유지되고 있고, b상 전압은 기동시 100V이고 운전용 상변환기 교체 직전까지 증가하고 있다. 그렇지만, 상변환기 교체 직후 85.81V로 감소한 다음 속도증가에 따라 다시 전압이 급격히 증가하고 있다. c상 전압은 기동시 75.91V에서 시작하여 상변환기 교체 슬립에서 최소전압을 보이고 있고, 속도증가에 따라 전압도 급격히 증가하고 있다.

(b)의 속도에 따른 상전류곡선에서 a상 전류는 기동시 3.68A에서 시작하여 속도가 증가함에 따라서 동기속도에 가까운 속도까지 계속적으로 감소하고 있다. b상 전류는 기동시 3.08A에서 상변환기 교체 슬립까지 일정하게 유지하지만, 상변환기 교체 후 1.72A까지 감소하여 속도증가에 따라 전류도 동기속도까지 계속적으로 완만하게 낮아지고 있다. c상 전류는 기동시 2.33A에서 시작하여 상변환기 교체 슬립까지 직선적으로 감소하다가 상변환기 교체 후 전류가 약간 상승한 다음 다시 속도증가에 따라 아래로 볼록한 곡선의 형태를 보이고 있다.

㉔ 역률특성

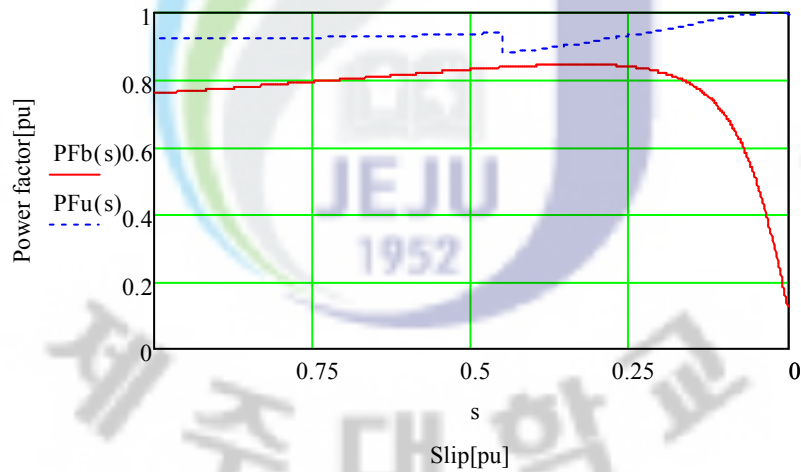


Fig. 24 Power factor characteristics

Fig. 24는 역률특성을 나타내고 있으며, 단상운전일 때 전 슬립범위에 대해 0.9pu와 1.0pu사이에서 역률특성을 보이고 있다. 평형운전인 경우 기동시 역률은 0.76pu이고 슬립이 0.33pu 근처에서 최고의 역률특성을 보이고 있으며 정격 운전속도인 0.167pu 이하에서는 역률이 급격히 낮아지고 있다.

㉞ 토크특성

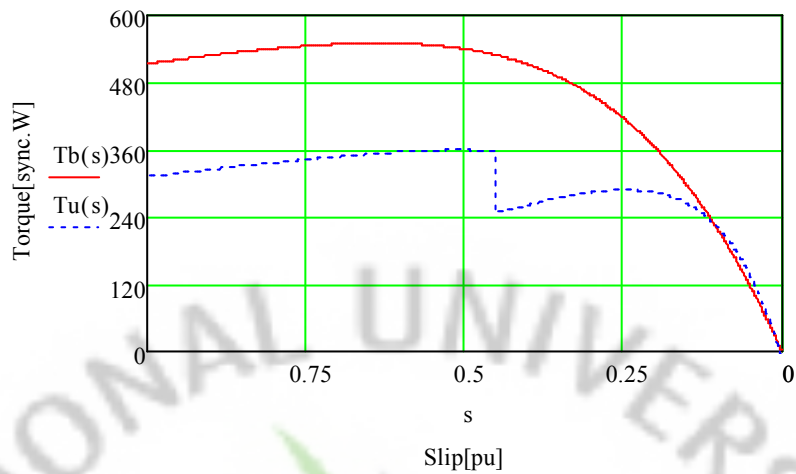


Fig. 25 Torque characteristics

Fig. 25는 토크특성을 나타내고 있으며, 단상운전일 때 기동토크는 312.62 sync ·W로 평형운전일 때의 기동토크인 512.88 sync ·W보다 200.26 sync ·W 낮은 토크 차이를 보이고 있다. 하지만 정격속도에서는 단상운전일 때와 평형운전일 때가 각각 271.64 sync ·W, 321.59 sync ·W로 대략 50 sync ·W 정도의 토크차이를 나타내고 있어 충분한 기동토크를 확보하여 스스로 기동할 수 있음을 보여주고 있다.

㉟ 출력특성

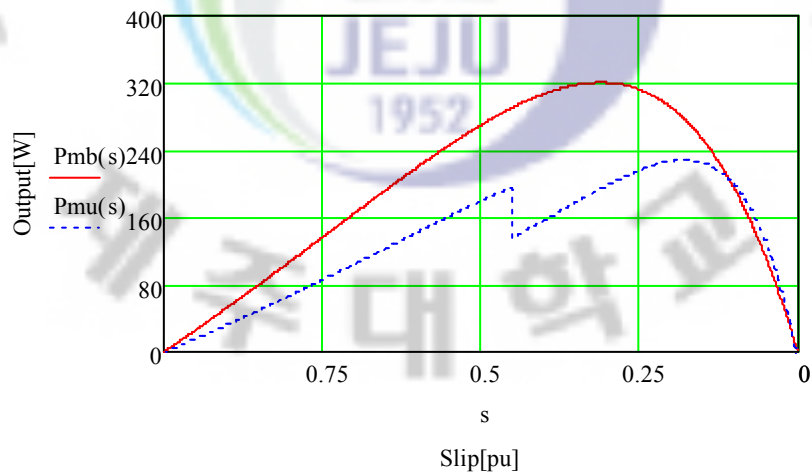


Fig. 26 Output characteristics

Fig. 26은 출력특성을 보이고 있으며, 평형운전일 때는 슬립 $s=0.30pu$ 에서 320.25W로 최대출력을 나타내고 있고, 단상운전일 때는 정격운전속도인 슬립

$s=0.167pu$ 부근에서 228.06W로 최대출력을 나타내고 있다.

◎ 효율특성

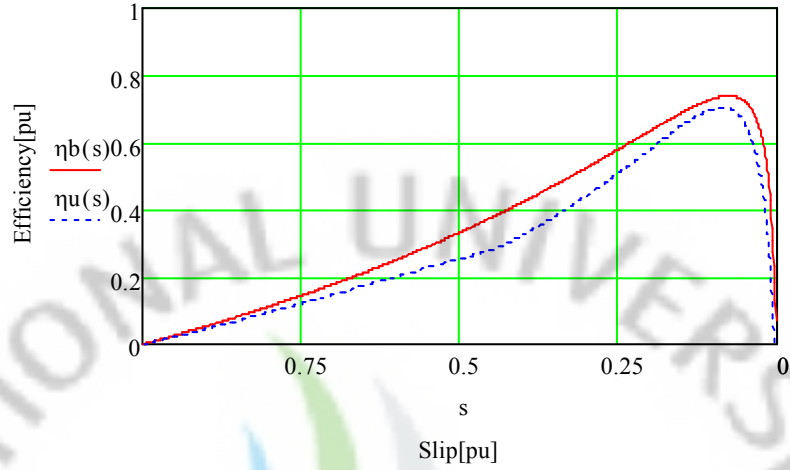
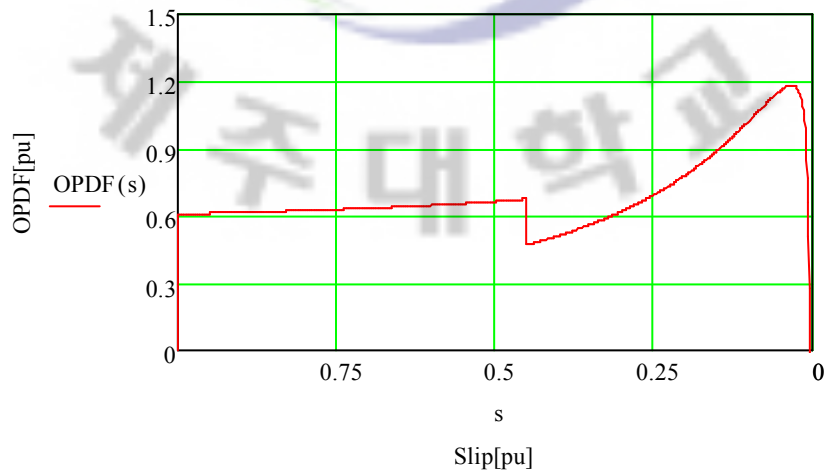


Fig. 27 Efficiency characteristics

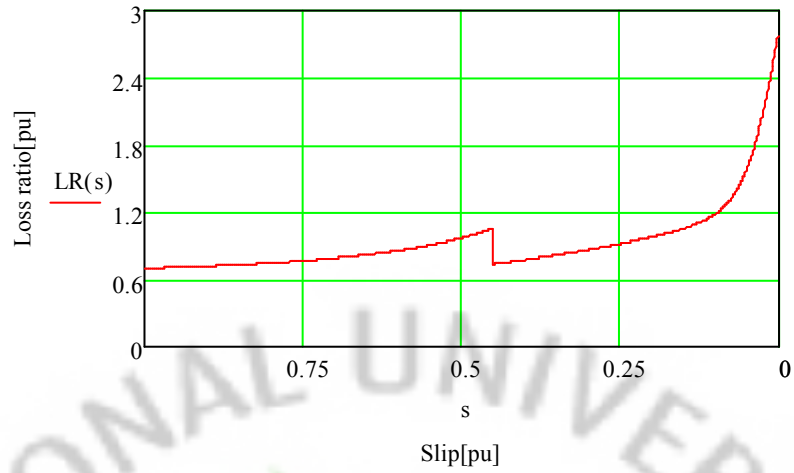
Fig. 27은 효율특성을 나타내고 있으며, 평형운전일 때와 단상운전일 때의 차이가 운전용 커패시터 교체 슬립점인 $s=0.45pu$ 에서 대략 1pu정도의 차이로 가장 크다. 전체 운전속도 범위에서는 비슷한 특성을 나타내고 있고, 정격운전속도에서 평형운전시와 단상운전시 효율은 각각 0.67pu, 0.63pu이다.

2) 출력감소율과 손실특성

㉠ 출력감소율



(a) Output power decrease factor



(b) Loss ratio

Fig. 28 Variation of output power decrease factor and loss ratio

Fig. 28은 출력감소율과 손실비 특성을 보이고 있고, (a)의 출력감소율 곡선에서 속도증가에 따라 거의 일정한 손실비 특성이 유지되고 있다. 정격운전속도에서 0.85pu로 3상 출력과 비교했을 때 단상운전에서의 출력이 85%의 값을 전 운전범위에서 유지되고 있으므로 양호한 출력특성을 보이고 있다.

(b)의 손실비 곡선에서 기동시 0.7pu이고 정격운전속도인 $s=0.167pu$ 에서 1.03pu로 대체적으로 전 운전범위에서 단상운전시 손실이 평형운전시 손실보다 낮게 나타나고 있어 단상운전시 손실 또한 양호한 특성을 보이고 있다.

㉔ 동손비와 무부하손비

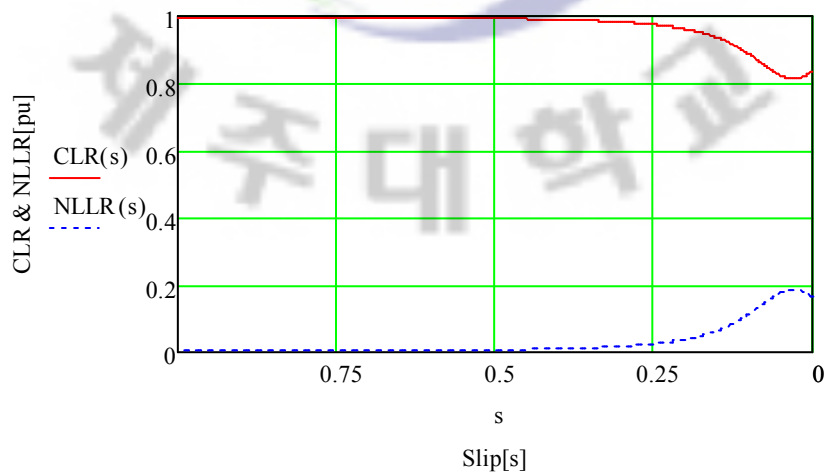


Fig. 29 Variation of no load loss and copper loss ratio

Fig. 29는 동손비와 무부하손비의 변화를 나타내고 있는데, 동손비는 저속에서 증가하고 고속에서는 아래로 볼록하게 감소하고 있으며, 기동시 0.1pu이고 정격운전속도에서는 0.95pu로 낮아지고 있다. 무부하손비는 저속에서 감소하고 고속에서는 위로 볼록하게 증가하고 있으며, 기동시 0.01pu이며 정격운전속도에서 0.05pu로 높아지고 있다. 이것은 전 운전범위에서 대부분 무부하손 보다 동손에 의한 손실이 크게 나타남을 의미한다.

㉔ 고정자 동손비와 회전자 동손비

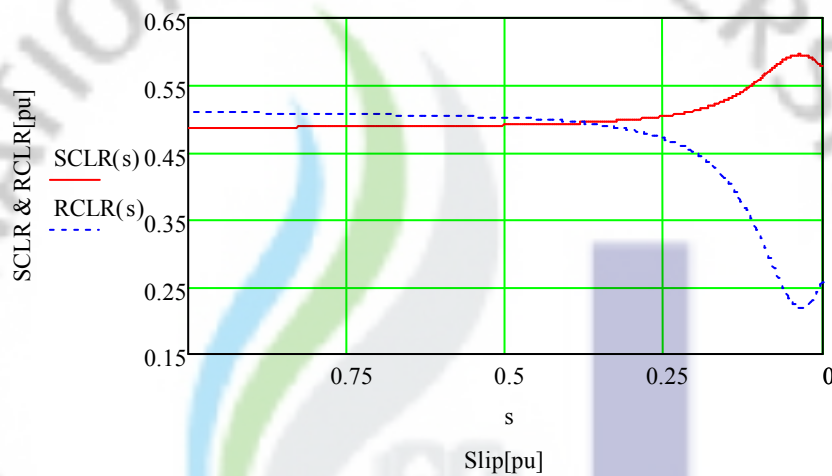


Fig. 30 Variation of stator copper loss and rotor copper loss ratio

Fig. 30은 고정자 동손비와 회전자 동손비의 변화를 보이고 있는데, 고정자 동손비는 저속에서 감소하고 고속에서 증가하고 있으며, 기동시 0.49pu에서 정격운전속도시 0.52pu로 변하고 있다. 회전자 동손비는 저속에서 증가하고 고속에서 아래로 볼록하게 고정자 동손비 변화율보다 크게 감소하고 있으며, 기동시 0.52pu이고 정격운전속도에서는 0.42pu로 감소하고 있다. 이것은 동기속도 부근의 고속에서 고정자 동손비는 역상분전류의 상승으로 인해 증가하고, 회전자 동손비는 속도가 증가하면 2차 전류가 감소하기 때문에 그 영향으로 감소한다.

4. 모노사이클릭결선 운전

상변환기 리액턴스 계산에서 기존의 방법에 의해 구한 결과 값과 각 소자의 리액턴스를 평형운전 조건식인 전압불평형률 식을 이용하여 대수계산 없이 간단하게 상변환기 리액턴스를 계산하는 두 가지 제안한 방법을 사용해서 기동시와 정격운전 속도에서 각각 구하여 비교한 결과 값을 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Comparison of both X_c and X_L computed by known and proposed methods

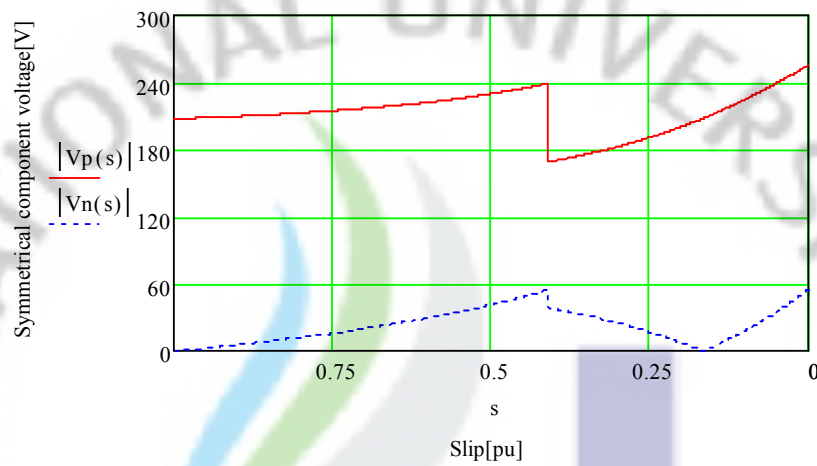
Method \ Slip[pu] X[Ω]	s=1 (at starting)		s=0.1667 (at rated starting)	
	X_c [Ω]	X_L [Ω]	X_c [Ω]	X_L [Ω]
Known (by eq.(142) & (143))	16.5778	48.8584	43.6571	110.4602
Proposed (by eq.(144) & (145))	16.5778	48.8584	43.6571	110.4602
Proposed (by eq.(146) & (147))	16.5778	48.8584	43.6571	110.4602

모노사이클릭결선에서 단상운전 특성을 해석하기 위해 스타인메츠결선 단상운전에서와 같이 Table 1에 이미 제시된 무부하손실을 반영한 T형 등가회로 정수를 적용하여 상변환기로 사용된 커패시터의 커패시턴스와 리액터의 리액턴스를 기동시와 정격운전속도에서 응용 소프트웨어(Mathcad)에 의해 초기값 ($X_c = X_L = 10\Omega$)을 사용하여 최소 전압불평형률 조건으로 하여 각각 구한다. 이와 같이 구한 X_c 와 X_L 값을 적용해서 기동용으로 계산한 커패시터와 리액터를 기동시(s=1pu)에, 운전용으로 구한 커패시턴스와 리액턴스를 전압불평형률이 같은 슬립인 s=0.41pu에서 교체하여 특성을 해석한다. Table 4에 보이는 바와 같이 기존의 방법에 의해 구한 결과 값과 제안한 2가지 방법에 의해 구한 결과 값이 정확히 일치하고 있으므로 제안한 방법의 적용 타당성이 있음을 나타내고 있다.

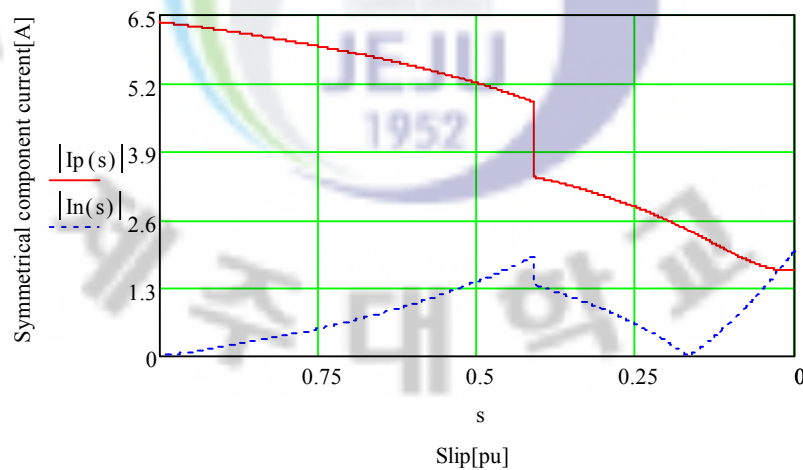
Table 1의 측정정수와 Table 4의 상변환기로 사용된 각 소자의 리액턴스인 X_c 와 X_L 값을 적용해서 모노사이클릭결선 단상운전 특성을 분석한다.

1) 운전특성

㉠ 대칭분전압과 전류



(a) Symmetrical component voltages



(b) Symmetrical component currents

Fig. 31 Symmetrical component voltages and currents

Fig. 31은 대칭분전압과 전류를 나타내고 있으며, (a)의 대칭분전압 곡선에서 정상분전압은 기동시 207.85V에서 운전용 상변환기 교체 슬립점인 $s=0.41pu$ 까지는 미소하게 증가하지만 상변환기 교체 후 69.65V 감소 후 속도가 증가함에 따라 동기속도까지 정상분전압도 증가하고 있다. 그리고 기동시 역상분전압은 0V로 정상분전압만 존재하며, 속도가 증가하여 상변환기 교체 직전에서 54.79V로 최대 역상분전압이 나타나고 있다. 그렇지만 상변환기 교체 직후 역상분전압은 감소하여 정격운전속도에서는 0V로 기동시의 역상분전압과 같이 최소 역상분전압을 보이고 있다. 이것은 기동시와 정격운전속도에서 전압불평형률이 0pu가 되어 평형운전시와 같은 특성이 됨을 의미하며, 이 대칭분전압은 대칭분 임피던스에 비례하여 대칭분 임피던스가 커지면 높아지고 대칭분 임피던스가 작아지면 대칭분전압도 낮아지는 특성을 갖는다.

(b)의 대칭분전류 곡선에서 기동시 정상분전류와 역상분전류는 각각 6.38A, 0A에서 속도 증가에 따라 정상분전류는 계속적으로 감소하여 정격운전속도인 $s=0.167pu$ 에서 2.40A를 나타내고 있다. 역상분전류는 기동 후 상변환기 교체 직전 1.91A로 최대 역상분전류 값을 보이지만 상변환기 교체 후 속도가 증가하여 정격운전속도에서는 0A로 역상분전류가 최소를 나타내고 있다. 이것은 결과적으로 기동시와 정격운전속도에서는 역상분전류는 흐르지 않고 정상분전류만 흐른다는 것을 의미한다.

㉔ 전압불평형률

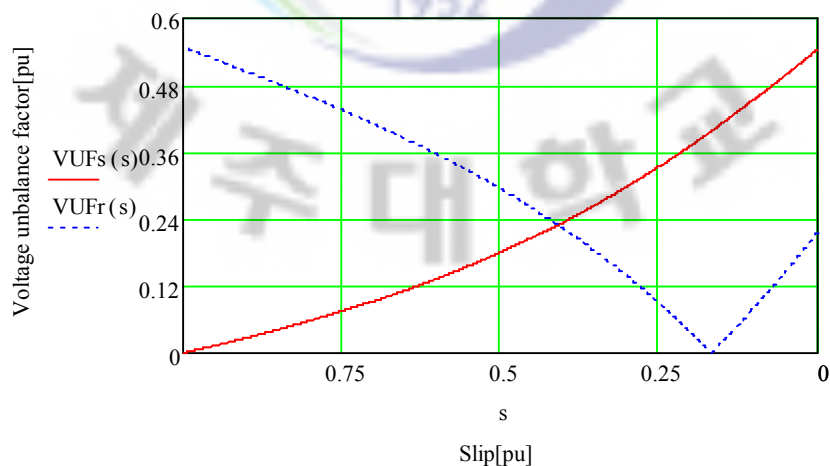


Fig. 32 Variation of voltage unbalance factors

Fig. 32는 기동용 상변환기인 X_c 와 X_L 을 기동시에 적용하여 구한 전압불평형률 VUF_s 와 운전용 상변환기인 X_c 와 X_L 을 정격운전속도에서 적용하여 구한 전압불평형률 VUF_r 이 속도에 따른 변화를 보이고 있다. 이 전압불평형률 곡선에서 보면 슬립 $s=0.41pu$ 에서 두 곡선이 교차하고 있고, 그 교차 슬립에서 전압불평형률이 $0.23pu$ 로 최대가 되므로 이 슬립에서 운전용 상변환기로 사용된 X_c 와 X_L 을 교체하여 운전한다. 그러면 전 운전 범위에 대해 전압불평형률을 $0.23pu$ 이하로 운전이 가능하고, 기동시와 정격운전속도에서는 전압불평형률이 $0pu$ 가 되어 이 슬립에서는 평형운전과 같은 특성이 됨을 의미한다. 이 전압불평형률은 Fig. 28의 대칭분전압에서 정상분전압과 역상분전압의 비율로써 나타낸다.

㉔ 전류불평형률

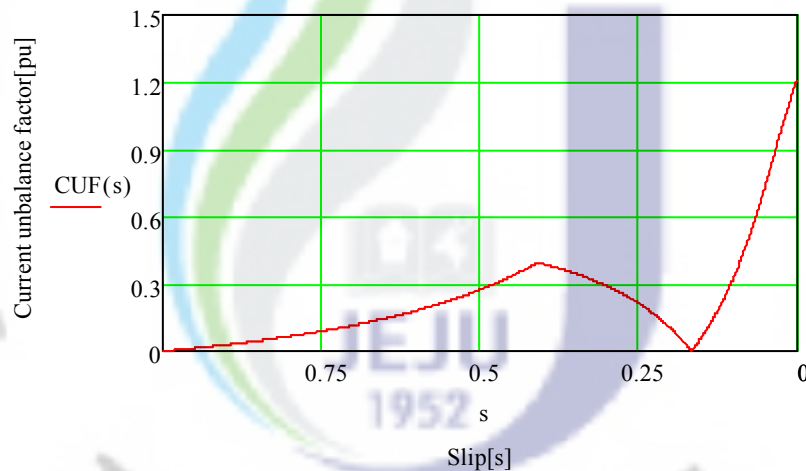
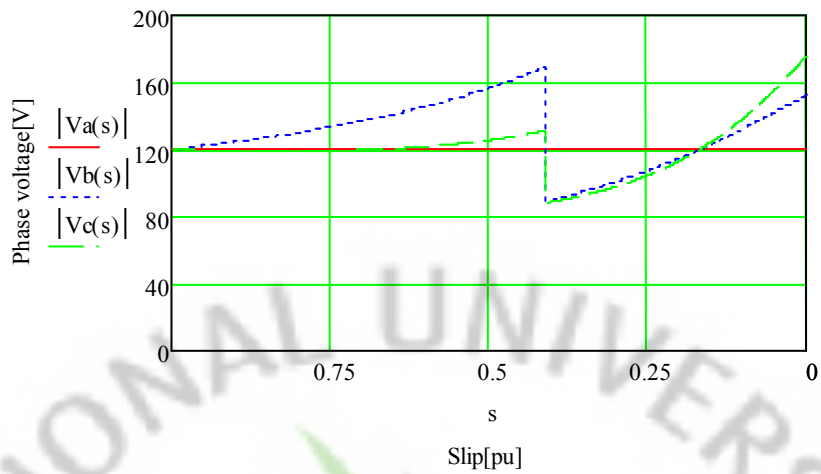


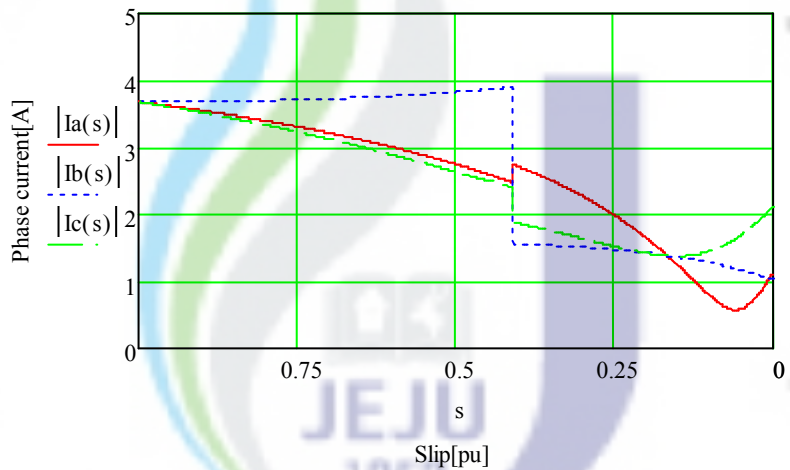
Fig. 33 Variation of current unbalance factor

Fig. 33은 속도에 따른 전류불평형률의 변화를 보이고 있고, 기동시 $0pu$ 의 전류불평형률을 나타내고 있으며, 운전용 상변환기 교체 슬립인 $0.41pu$ 에서 $0.40pu$ 로 최대 전류불평형률을 보인다. 그렇지만 속도가 증가하여 정격운전속도에서는 기동시의 전류불평형률과 같은 $0pu$ 의 값을 나타내고 있다. 이 전류불평형률은 Fig. 31의 대칭분전류에서 정상분전류와 역상분전류의 비율로 나타낸다.

㉔ 상전압과 상전류



(a) Phase voltages



(b) Phase currents

Fig. 34 Variation of phase voltages and currents

Fig. 34는 속도에 따른 상전압과 상전류의 변화를 보이고 있다. (a)의 상전압 곡선에서 a상 전압은 기동에서 동기속도까지 120V로 일정하게 유지되고 있다. b상과 c상 전압은 기동시 120V로 같고 운전용 상변환기 교체 전까지는 증가하지만 운전용 상변환기 교체 후부터는 b상과 c상 전압이 감소하기 시작하여 정격운전 속도에서는 a상, b상 그리고 c상 전압이 120V로 일치하여 평형운전과 같아지는 상전압 특성을 보이고 있다.

(b)의 상전류 곡선에서 기동시 a상, b상, c상 전류는 3.68A로 같고, 운전용 상변

환기로 교체하기 전까지 b상 전류는 기동시와 비슷한 값을 유지하며, a상과 c상 전류는 2.45A로 감소하는 특성을 보인다. 그리고 운전용 상변환기 교체 후 정격속도에서 1.38A로 a상, b상, c상 전류가 일치하는 상전류 특성을 나타내고 있다.

㉔ 역률특성

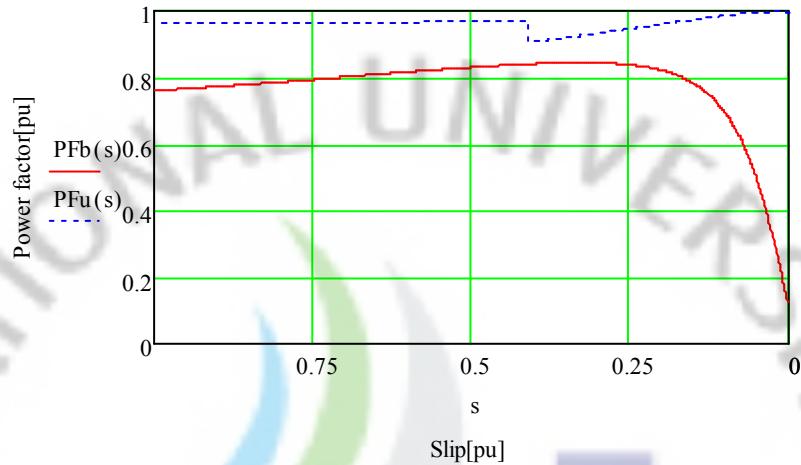


Fig. 35 Power factor characteristics

Fig. 35는 역률특성을 보이고 있는 것으로 평형운전일 때 기동시 역률은 0.76pu이고 $s=0.33pu$ 에서 최대역률 0.85pu를 보이며, 정격운전속도 이상의 속도에서 급격히 감소하고 있다. 그러나 단상운전인 경우 전 운전범위에서 전반적으로 0.9pu 이상의 양호한 역률특성을 보이고, 평형운전시보다 양호하다.

㉕ 토크특성

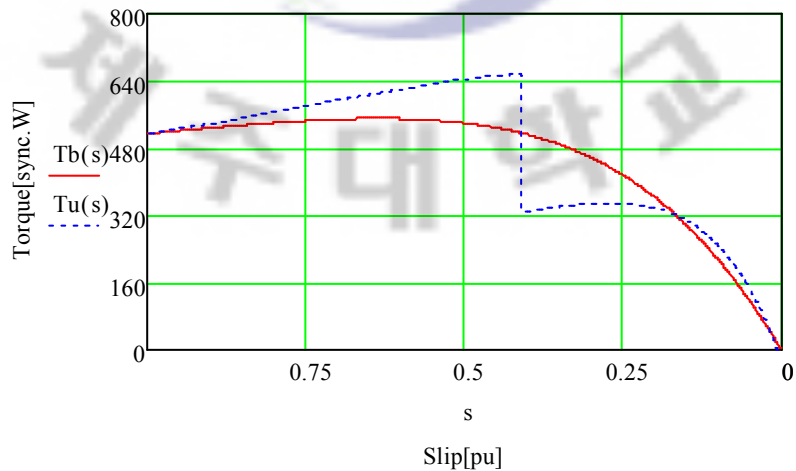


Fig. 36 Torque characteristics

Fig. 36은 토크특성을 보이고 있으며, 기동토크는 513.51 sync·W로 단상운전과 평형운전일 때 모두 같다. 속도가 증가하여 운전용 상변환기 교체 슬립에서 토크의 변동이 발생하지만 정격운전속도에서 단상운전과 평형운전의 토크특성이 320.66 sync·W로 기동시와 같이 일치하는 매우 양호한 토크특성을 보이고 있다.

㉞ 출력특성

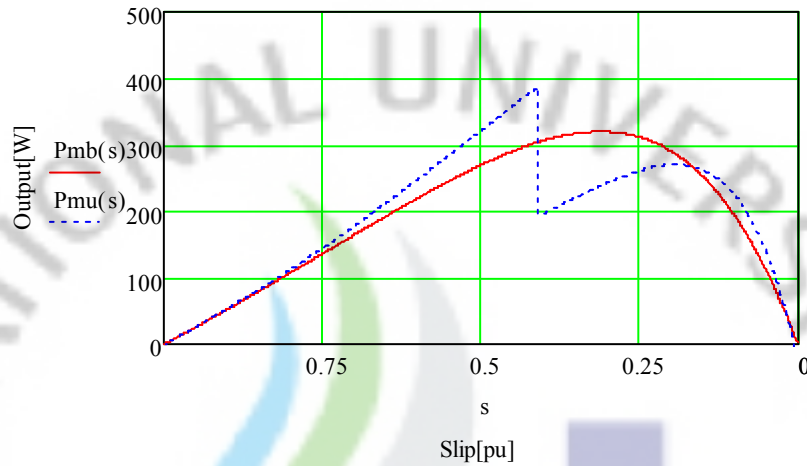


Fig. 37 Output characteristics

Fig. 37은 출력특성을 보이고 있으며, 평형운전과 단상운전일 때 모두 기동시 출력은 0W로 같다. 평형운전인 경우 $s=0.31pu$ 에서 최대출력 320.40W이고, 단상운전일 때는 운전용 상변환기 교체 슬립에서 출력변동이 발생하지만 정격운전속도에서 267.28W로 단상운전과 평형운전의 출력이 같은 특성을 보이고 있다.

㉞ 효율특성

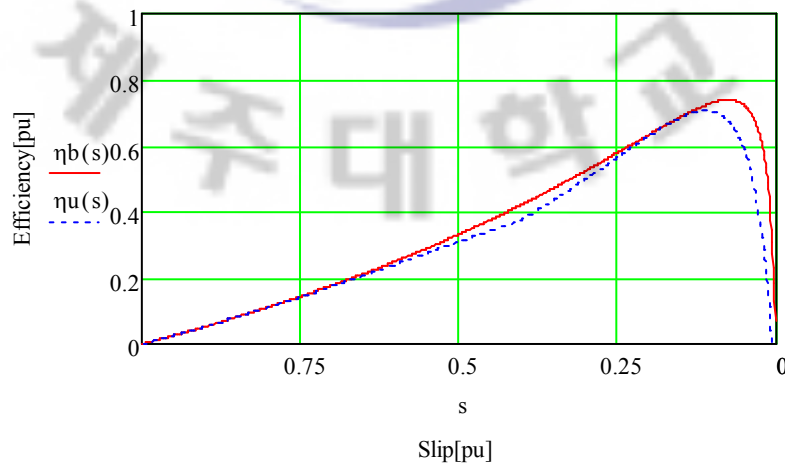
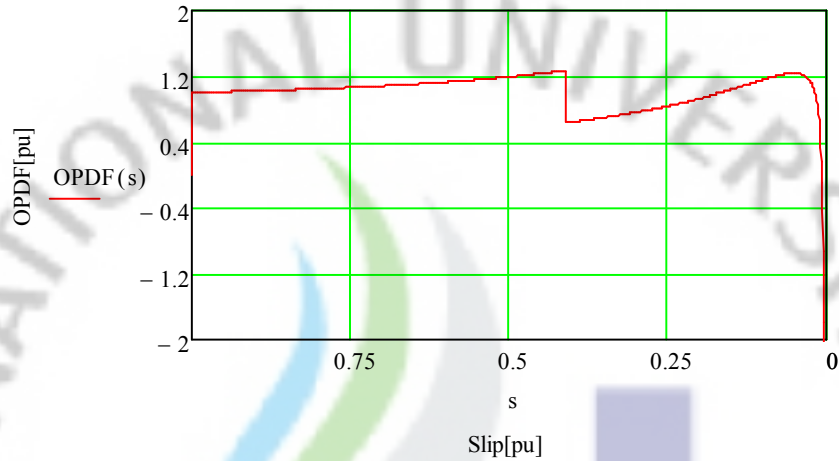


Fig. 38 Efficiency characteristics

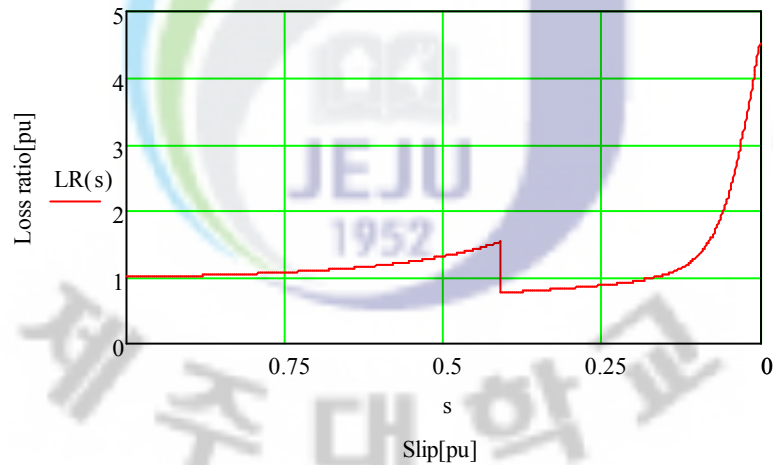
Fig. 38은 효율특성을 보이고 있고, 평형운전일 때와 단상운전일 때 모두 기동시 0pu에서 동기속도까지의 효율특성이 비슷하며 정격운전속도인 $s=0.167pu$ 에서 효율이 0.67pu로 단상운전과 평형운전의 효율특성이 일치하고 있다.

2) 출력감소율과 손실특성

㉠ 출력감소율과 손실비



(a) Output power decrease factor



(b) Loss ratio

Fig. 39 Variation of output power decrease factor and loss ratio

Fig. 39는 출력감소율과 손실비의 변화를 보이고 있다. (a)의 출력감소율 곡선에서 기동시부터 동기속도까지 1pu로 일정하게 유지되고 있으며, 단상운전시 출력이 평형운전시와 같은 출력을 발생함을 나타내고 있다.

(b)의 손실비 곡선에서 기동시 1pu이고 상변환기 교체 슬립점인 $s=0.41$ 에서

손실비가 0.77pu 낮아지긴 하지만 정격운전속도시에 기동시와 같은 1pu로 운전되고 있다. 저속에서는 평형운전시와 크게 상이하지 않으나 정격운전속도 이상의 고속에서는 단상운전시 손실이 급격히 증가되고 있음을 알 수 있다.

㉞ 동손비와 무부하손비

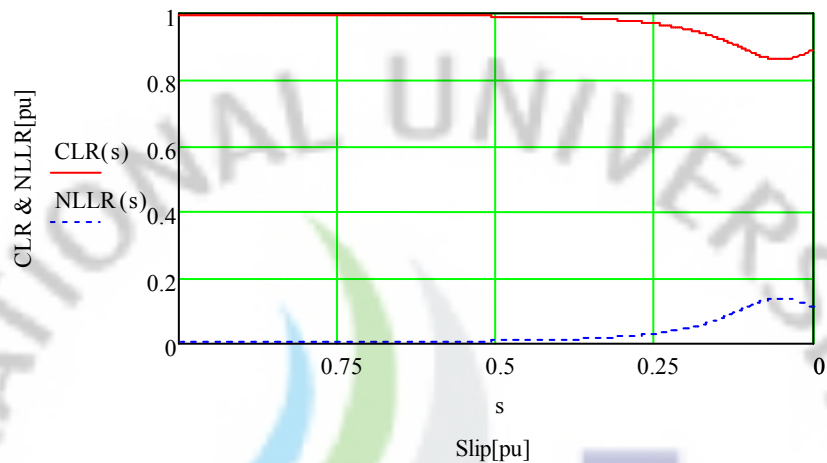


Fig. 40 Variation of no load loss and copper loss ratio

Fig. 40은 동손비와 무부하손비의 변화를 보이고 있고, 동손비는 기동시 1pu, $s=0.05pu$ 에서 최저값인 0.86pu로 저속에서 높고 고속에서는 아래로 볼록한 변화를 하고 있다. 무부하손비는 기동시 0pu이고 $s=0.05pu$ 에서 최고값인 0.14pu로 저속에서 낮고 고속에서는 위로 볼록한 특성을 보이고 있다.

㉟ 고정자 동손비와 회전자 동손비

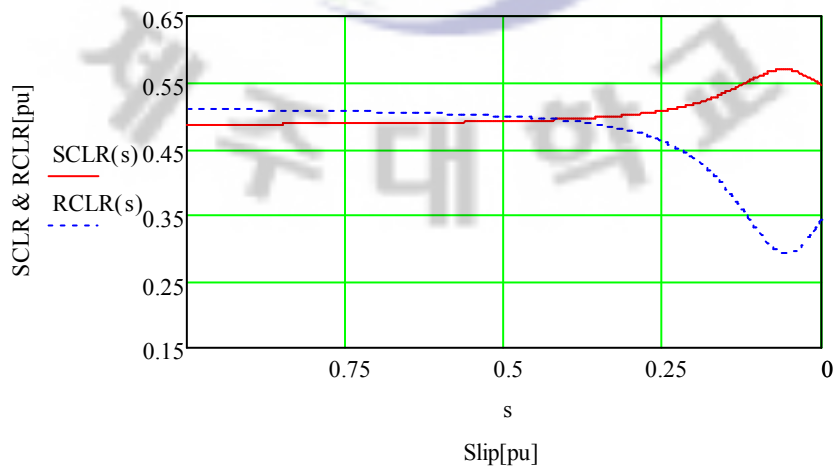


Fig. 41 Variation of stator copper loss and rotor copper loss ratio

Fig. 41은 고정자 동손비와 회전자 동손비의 변화를 보이고 있다. 고정자 동손비는 기동시 0.49pu이고 $s=0.06pu$ 에서 최고값인 0.57pu로 저속에서 낮고 고속에서 위로 불룩하게 변화하는 특성을 보이고 있다. 회전자 동손비는 기동시 0.51pu이고 $s=0.06pu$ 에서 최저값인 0.29pu로 저속에서는 높고 고속에서는 아래로 불룩하게 변화하는 특성을 보이고 있는데 고정자 동손비보다는 크게 변화하고 있다.



5. 결과 및 고찰

본 절에서는 각각의 단상운전 결선방식에 따라 해석하여 시뮬레이션한 각종 운전특성 결과에 대해서 전반적으로 고찰하고자 한다.

단상결선 운전결과에서 전압불평형률은 기동시 1.0pu로 매우 높았으며 이로 인하여 기동토크는 0 sync·W로 스스로 기동할 수 없다. 외부의 힘에 의해 기동하더라도 운전토크 또한 평형운전에 비해 매우 낮은 것을 알 수 있었다. 그리고 출력특성도 마찬가지로 전 운전범위에서 평형운전시 출력에 절반 정도밖에 미치지 못했으며, 효율특성은 정격운전속도에서 평형운전시 효율보다 단상운전시 효율이 0.21pu로 낮았다. 하지만 역률특성은 평형운전과 비교했을 때 모든 운전 범위에서 비슷한 특성을 보였다.

손실특성에서 손실비는 정격운전속도 기준으로 하여 저속에서는 3상 평형운전시보다 단상운전시 손실이 낮고, 고속에서는 그 반대로 평형운전시보다 단상운전시에 불평형에 의한 역상분전류의 증가로 인해 손실이 증가하였다. 동손비와 무부하손비는 각각 저속에서는 동손비가 크고 무부하손비가 낮았다. 그러나 고속에서는 회전자 전류의 감소로 인해 회전자 동손비가 감소하게 되어 동손비는 감소하였고, 무부하손비는 마찰손과 풍손 등의 기계손 증가로 인하여 증가함을 확인할 수 있었다. 그리고 고정자 동손비와 회전자 동손비는 기동시부터 정격속도까지의 운전 범위에서는 0.5pu로 비슷하고, 동기속도에 가까워질수록 고정자 동손비는 역상분전류의 상승으로 약간 증가하고, 회전자 동손비는 회전자 전류의 감소로 인해 회전자 동손비도 함께 감소하였다.

스타인메츠결선 단상운전의 결과에서 전압불평형률은 상변환기 교체 슬립에서 0.38pu로 다른 슬립구간에서보다 비교적 높게 나타나기는 했지만 기동시와 정격운전속도에서 각각 0.26pu, 0.13pu로 낮게 나타났다. 기동토크는 평형운전시 기동토크에 60% 정도의 기동토크를 얻어 운전이 가능함은 물론 정격운전속도에서의 토크는 평형운전일 때와 크게 상이하지 않았다. 그리고 역률특성은 상변환기로 사용된 커패시터의 영향으로 역률을 보상하게 되어 오히려 평형운전시 역률보다는 높게 나타났다. 출력특성은 상변환기 교체슬립(slip=0.45)에서 최대의 출력차이를 보이긴 했지만 정격운전속도 부근에서의 출력은 50W 정도의 차이만을 보여서 전

운전범위에서 대체적으로 평형운전시의 80% 출력특성을 나타냈다. 효율특성은 상변환기 교체 슬립에서 최대 1pu 정도만 있을 뿐 전 운전범위에서 평형운전과 큰 차이가 없어 평형운전시와 비슷한 효율특성을 보였다.

모노사이클릭결선 단상운전에서 전압불평형률은 운전용 상변환기 교체 슬립점에서 0.23pu로 약간 높긴 하지만 기동시와 정격운전속도시 전압불평형률이 0pu로 매우 낮아 양호했다. 기동토크와 정격운전속도에서의 운전토크는 평형운전시와 같으며, 출력특성은 운전용 상변환기 교체 직후의 특성이 평형운전에 비해 다소 낮긴 하지만 그 외의 운전범위에서와 특히 정격운전시의 출력특성은 평형운전과 일치하는 특성을 보였다. 그리고 효율특성은 전 운전범위에서 평형운전과 비슷한 특성을 보였으며, 역률특성은 상변환기로 사용된 커패시터의 영향으로 부가적으로 역률을 보상하게 되어 오히려 평형운전일 때보다 양호한 역률특성이 나타났다. 그리고 스타인메츠결선과 모노사이클릭결선 단상운전에서의 손실특성은 단상결선 운전시 손실특성과 비슷함을 알 수 있었다.

따라서, 단상결선 운전에서의 운전특성들은 3상 평형운전 특성에 비해 매우 낮았고, 전압불평형률이 매우 높아 기동토크가 발생하지 못해 스스로 기동할 수 없으므로 단상전원만으로 운전이 불가능하다. 그러므로 단상결선 운전으로 기동하게 되면 과전류로 인해 전동기가 소손됨을 의미하므로 고장상태라 할 수 있다. 그러나 스타인메츠결선과 모노사이클릭결선에 의한 단상운전은 단상전원만으로 충분한 기동토크를 확보하여 스스로 기동할 수 있음을 확인하였다. 그 외의 운전특성들도 3상 평형운전특성보다는 못하지만 단상전원만으로 양호한 운전특성을 얻을 수 있으므로 단상전원에 의한 3상 유도전동기의 운전가능성을 검증할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문은 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 운전특성을 해석하였다. 해석을 위하여 운전특성에 관련된 식들을 유도하기 위해 대칭분 해석을 적용하였고, 무부하손실이 특성계산에 직접 반영될 수 있는 T형 등가회로 정수를 사용하였다. 전압불평형률을 최소화하여 운전하기 위해 기동시와 정격속도에서 구한 두 개의 상변환기 리액턴스를 사용해서 단상운전시 운전특성을 계산하였다. 그리고 각각의 단상운전에서 구한 운전특성을 3상 평형운전시의 운전특성과 비교하고 분석하여 운전가능성을 확인하였다.

정밀한 운전특성 해석을 위하여 측정에 의해서 얻은 무부하손실이 반영된 정수와 제작회사에서 제공한 무부하손실이 반영되지 않은 정수를 사용해서 3상 평형운전에서 전 슬립에 대하여 토크를 계산하고 토크차를 비교하였다. 비교 결과, 운전특성 계산시 무부하손실을 고려할 필요성을 확인하여 특성계산에 무부하손실이 반영된 T형 등가회로 정수를 적용하였다. 그리고 3상 유도전동기를 단상전원에 의하여 운전하기 위한 방법으로써 스타인메츠결선과 모노사이클릭결선에 의한 운전방법에 대하여 제반특성을 해석하였고, 단상결선의 결상운전 특성에 대하여도 스타인메츠결선과 모노사이클릭결선의 단상운전 특성과 비교하기 위하여 참고로 해석하였다.

본 논문에서는 스타인메츠결선 단상운전에서 전압불평형 정도를 줄여 운전하기 위한 상변환기 커패시턴스를 최소 전압불평형률 조건에 의하여 기동과 정격 운전속도에서 각각 결정하였다. 또한, 모노사이클릭결선 단상운전에서는 상변환기 리액턴스를 임의의 속도에서 전압불평형률이 영이 되는 평형운전 조건을 이용해서 복잡한 대수계산 없이 응용 소프트웨어를 사용하여 간단하게 계산하는 방법을 제안하였다. 그리고 제안한 방법과 기존 방법의 결과를 비교하여 방법의 적용성을 확인하였다. 3상 평형운전시 출력과 손실에 대한 단상운전시 출력과 손실의 비율로써 각각 출력감소율과 손실비를 정의하여 계산하고, 단상운전시 동손비, 무부하손비, 고정자 동손비, 회전자 동손비 등이 차지하는 비율을

각각 정의하여 계산함으로써 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 각종 손실특성을 분석하였다.

분석 결과, 단상전원에 접속된 스타인메츠결선과 모노사이클릭결선 모두 기동토크를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 제반 운전특성이 3상 평형운전에 비하여 떨어지지만 그 정도가 매우 크지 않으므로 단상운전의 이용 가능성을 확인할 수 있었다. 그리고 모노사이클릭결선에 의한 운전특성이 스타인메츠결선보다 비교적 우수하여 단상운전에 더욱 적합함을 알 수 있었다.

따라서 이 논문은 3상 유도전동기를 단상전원에 의하여 운전할 때 적절한 상변환기 결정은 물론 각종 운전특성 및 손실을 운전 전에 분석함으로써 효율적인 단상운전에 활용될 수 있을 것이다. 또한 앞으로의 연구로 단상운전에 대한 과도특성과 전력변환기에 의한 상변환기 리액턴스의 조정으로 운전특성 개선에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

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] 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, IEE Proc., Pt.C, No.15, pp.244-249, 1962.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 김도진, 좌종근, 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 운전 특성분석(I), 제주대학교 첨단기술 연구소 논문집, 제17권 1호, pp.45-51, 2006.
- [7] 김도진, 좌종근, 스타인메츠결선에서 커패시턴스의 결정, 제주대학교 첨단 기술 연구소 논문집, 제17권 2호, pp.57-60, 2006.
- [8] 김도진, 강상수, 좌종근, 스타인메츠결선 유도전동기에 대한 권선전류 분석, 대한전기학회 제주지부 합동 학술발표회 논문집, 제22집, pp.54-57, 2007.
- [9] 김도진, 좌종근, 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 운전특성분석(II), 제주대학교 첨단기술 연구소 논문집, 제18권, pp.7-11, 2007.
- [10] 김도진, 좌종근, 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 손실분석, 대한전기

- 학회 논문지, 제57P권 2호, pp.121-126, 2008.
- [11] 김도진, 강상수, 강남호, 좌종근, 단상전원에 접속된 3상 유도전동기의 권선전류 분석, 대한전기학회 제39회 하계학술대회 논문집, p.214, 2008.
- [12] T. Irlisa, On the optimal control for monocyclic starting of three phase induction motors, JIEE, Vol. 84-12, No. 915, pp.78-85, 1964.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 김도진, 좌종근, 모노사이클릭기동 유도전동기의 상변환기 리액턴스 결정, 대한전기학회 논문지, 제57P권 1호, pp.41-45, 2008.
- [17] J. L. Bhattacharya and J. L. Woodward, Excitation balancing of a self-excited induction generator for maximum power output, IEE Proc., Vol.135, Pt.C, No.2, 1988.
- [18] T. F. Chan, Performance analysis of a three phase induction generator self-excited with a single capacitance, IEEE Trans. EC, Vol.14, No.4, pp.894-900, 1999.
- [19] T. F. Chan and L. L. Lai, Capacitance requirements of a three-phase induction generator self-excited with a single capacitance and supplying a single-phase load, IEEE Trans. EC, Vol.17, No.1, pp.90-94, 2002.
- [20] P. C. Sen, Principles of Electric Machines and Power

Electronics, John Wiley & Sons, p.227, 1997.

- [21] 문경주, 조용철, 좌중근, 2차측에 정류회로를 이용한 유도전동기의 불평형 전압 운전해석, 제주대학교 정보통신연구소 논문집, 제2권, pp.65-70, 1999.
- [22] T. H. Barton and V. Ahmad, The measurement of induction motor stray loss and its effect on performance, IEE Proc., 105C, pp.69-75, 1957.
- [23] 한국공업규격, 3상 유도전동기의 특성 산정방법, KSC 4201, 1986.
- [24] 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.



감사의 글

처음 大學校庭에 들어선 지가 어느덧 10여년, 찰나같이 지난 것 같은데 강산도 한번쯤은 족히 바뀌었을 시간이 되어 버렸습니다. 철부지 시절에 시작하여 소위 학문의 象牙塔이라는 이 자리에 오기까지 한눈팔 겨를조차 없이 앞만 보고 달려 온 지난날을 돌이켜보니 힘들었던 일, 재미있었던 일, 아쉬웠던 일들이 눈앞에 走馬燈처럼 스치고 이 모든 것들이 아름다운 추억으로 아로새겨집니다.

본 論文이 완성되기까지 하루하루 勞心焦思하시며 세심한 配慮와 指導鞭撻로 부족하기만한 저를 풍부한 識見은 물론 인격적 修養까지도 몸소 실천으로 가르쳐 주신 좌종근 指導教授님께 진심으로 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 따뜻한 激勵과 애정어린 조언을 해 주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님 등 電氣工學科 교수님과 멀리 제주도까지 오셔서 論文審査에 흔쾌히 응해주신 成均館大學校 원충연 교수님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 옆에서 항상 용기를 잃지 않도록 督勵해 주신 강경보 교수님, 고봉운 교수님, 그리고 濟州産業情報大學 電氣消防安全科에 계신 여러 선생님, 자주 찾아뵙지도 못했는데 보이지 않는 곳에서 조용하면서도 진정어린 聲援을 해 주신 翰林工業高等學校 電氣科 선생님 등 저를 가르쳐주신 모든 恩師님들께도 감사하다는 말씀을 전합니다.

博士課程 동안 서로 의지하며 든든한 버팀목이 되어준 황충구 부장님, 상호 형, 후배 재홍이를 비롯하여 物心兩面으로 행정적 지원을 아끼지 않은 조교선생님, 그리고 電氣機器 연구실 가족들에게도 고마움을 표하며, 논문 막바지 교정에 밤낮 가리지 않고 이모저모 도와준 오창진 형, 부창진 박사에게도 고맙게 생각합니다. 가까이 있으면서도 늦게나마 공부한답시고 얼굴 한번 제대로 비치지 못했지만 그래도 나무라지 않고 헤아려준 竹馬故友들 - 군호, 태현, 정준, 현중, 홍철, 경범 - 에게도 고맙다는 말을 꼭 전하고 싶습니다.

끝으로 지금의 제가 있기까지 不肖한 막내아들을 獻身的인 사랑과 희생으로 감싸주시고 한없는 신뢰를 보내주신 어머니와 먼발치에서 응원하며 여러모로 支持해 준 큰형, 누나, 작은형 등 가족들과 이 기쁨을 함께하려 합니다.