

碩士學位論文

回轉子에 整流回路를 이용한
誘導電動機의 交流回路 모델에 의한 解析



電子電氣工學科

文 璟 周

1 9 9 9

碩士學位論文

回轉子에 整流回路를 이용한
誘導電動機의 交流回路 모델에 의한 解析

指導教授 左 宗 根



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

文 璟 周

1 9 9 9

回轉子에 整流回路를 이용한
誘導電動機의 交流回路 모델에 의한 解析

指導教授 左 宗 根

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

1999年 6月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科(電氣工學)



文璟周의 工學 碩士學位 論文을 認准함

1999年 6月 日

委員長	印
委員	印
委員	印

Analysis of Induction Motor using
Rectifier Circuit in the Rotor circuit by
AC circuit Model

Kyung-Joo Moon

(Supervised by professor Chong-Keun Jwa)

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

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND
ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1999. 6

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 해석이론	3
2.1 회로의 구성	3
2.2 회로모델과 전류 중복각의 계산	4
2.3 교류회로모델과 특성식	8
2.3.1 Sen의 방법	8
2.3.2 제안한 방법	11
III. 수치해석 및 검토	13
IV. 결 론	19
참고문헌	20
부 록	21

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematic diagram for induction motor with rotor rectifier circuit	3
Fig. 2 Circuit model of induction motor using rectifier circuit in rotor side	4
Fig. 3 Equivalent circuit model per phase.	5
Fig. 4 Thevenin equivalent circuit model.	5
Fig. 5 Per-phase 5 elements AC circuit model	8
Fig. 6 Per-phase 6 elements AC circuit model	11
Fig. 7 Input current of the system with external resistance in rotor side	15
Fig. 8 Output torque of the system with external resistance in rotor side	16
Fig. 9 Input current of the system without external resistance in rotor side	17
Fig. 10 Output torque of the system without external resistance in rotor side	18
Fig. 11 Three phase bridge circuit	21
Fig. 12 Overlap angle	22

LIST OF TABLES

Table 1	Circuit model parameters	13
Table 2	Input current of the system with external resistance in rotor side	15
Table 3	Output torque of the system with external resistance in rotor side	16
Table 4	Input current of the system without external resistance in rotor side	17
Table 5	Output torque of the system without external resistance in rotor side	18



Analysis of Induction Motor using Rectifier Circuit in the Rotor circuit by AC circuit Model

Kyung-Joo Moon

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Supervised by professor Chong-Keun Jwa

Summary

In this paper, the characteristics of induction motor which has rotor rectifier circuit are analyzed using a new six elements ac model. The effects of resistance on dc circuit which are caused by current over lap angle and voltage drop of rectifier are considered in the proposed model for this analysis. The proposed model and Sen's five elements ac model which is not considered these effects are used to analyze, and the analyzed results are compared with the experimental results in order to verify the proposed model. It is found that the results of the proposed method are good agreement with the experimental results.

I. 서 론

권선형 유도전동기는 종래부터 회전자에 저항초퍼방식, 정지크래머방식과 정지셀비어스방식을 이용하여 널리 사용되고 있다. 회전자에 정류회로에 의하여 슬립전력을 제어하여 속도를 제어하고 있다. 이러한 방식들은 회전자에 슬립전력을 제어하는 것으로서 속도제어시 많이 이용되고 있다. 이때 회전자에 외부 시스템이 추가되므로써 유도기의 회로정수를 정확하게 해석할 필요가 있다.

이와 관련하여 Hori(Hori, 1967)는 1차측으로 환산한 3상 등가 회로에 의하여 정지 2차 여자방식의 특성을 저항분을 고려하여 정류회로의 중복각과 유효전류와의 관계를 명확히 해석하였다. Sen 등(1975)은 저항 초퍼 제어방식을 2차측으로 환산한 직류모델과 1차측에서 계산할 수 있는 교류모델을 가지고 해석하였다. Sen등의 방법은 전류중복기간중의 권선저항에 의한 전압강하의 영향을 고려하지 않았기 때문에 비교적 용량이 큰 전동기의 전부하운전 부근에서 정도가 좋으나 저항성분의 영향을 크게 받는 경부하의 범위에서 정도가 나쁘고 특히 소용량 전동기의 경우 권선 임피던스에 접하는 저항성분의 비율이 크게 되므로 정도가 떨어진다. 이를 해결하기 위하여 Sakui 등(1978)은 회전자 초퍼 제어방식을 정류기 순전압강하는 물론 중복기간의 전류에 의한 권선저항의 전압강하를 고려하여 해석하였다. Jones 등(1975)과 Sakui 등(1980)은 교류측에 임피던스를 가지는 3상브리지 정류회로의 계산방법을 제시하였다. 또한 Sakui 등(1979)과 Sakui 등(1980)은 2차측에 정류회로를 가지는 유도전동기의 교류모델을 1차측으로 환산한 여자회로와 부하회로로 분리하여 중복각은 물론 이로 인한 전류성분의 영향도 고려하여 해석하였다.

이들 중에 교류회로 모델로는 5소자회로(Sen, 1975)와 6소자회로모델이

사용되었다. 후자의 경우는 3상 등가 회로(Hori, 1967)를 사용하거나 1상당 등가 회로를 여자회로와 부하회로로 나누어 해석(Sakui & Fujita, 1979, 1980)하여 합성하고 있으므로 계산과정이 다소 복잡하다.

본 연구에서는 1차회로로 환산한 1상당 6소자 교류회로 모델을 제안하고 정류기의 전압강하와 중복각에 의한 직류회로의 저항의 영향을 고려하여 간결하게 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 방법의 타당성을 검증하기 위하여 제작회사에서 제공한 회로정수를 5소자 교류모델(Sen, 1975)에 사용하여 해석하고, 측정에 의한 회로정수(좌종근, 1998)를 제안한 6소자 교류회로모델에 적용하여 해석하여 실측치와 비교 검토하였다.



II. 해석이론

2.1 회로의 구성

회전자에 정류회로를 접속한 유도전동기의 2차 전압 제어 방식에는 정류 회로에 의한 직류전력을 전기시스템으로 반환하는 셀비어스방식, 기계시스템으로 반환하는 크래머방식, 회전자 삽입저항에서 소비시키는 초퍼방식 등이 있다. 본 연구에서는 이들 방식의 정상상태 해석을 위한 회로모델을 제안하고, 기초자료를 얻기 위하여 회전자 삽입저항에 의한 운전을 해석하였다.

연구에 사용한 유도전동기 회전자에 정류회로를 가지는 회로의 기본구성을 Fig. 1에 보인다. 권선형 3상 유도전동기의 회전자회로에 3상 브리지 정류회로를 접속하고 출력측에 고정저항 R_{ex} 와 스위치를 병렬로 접속하여 고정저항을 스위치에 의하여 개폐할 수 있도록 하였다.

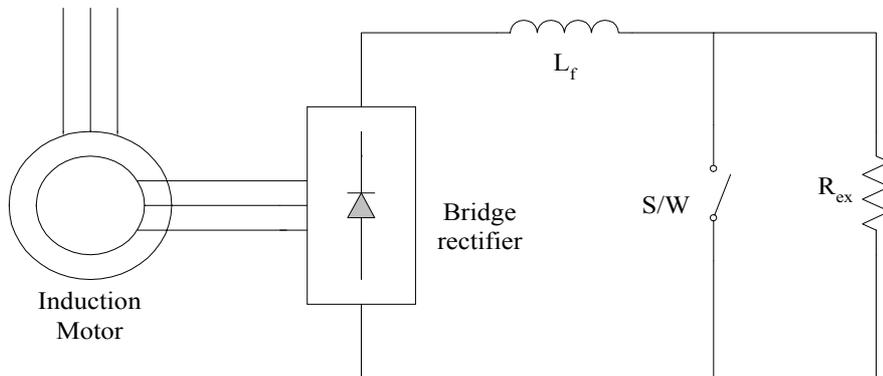


Fig. 1 Schematic diagram for induction motor with rotor rectifier circuit

2.2 회로모델과 전류 중복각의 계산

Fig. 1의 회전자에 정류회로를 가지는 유도전동기의 1차 측으로 환산한 회로모델은 Fig. 2와 같고 Fig. 1과 2에서 문자기호는 다음과 같이 정의한다.

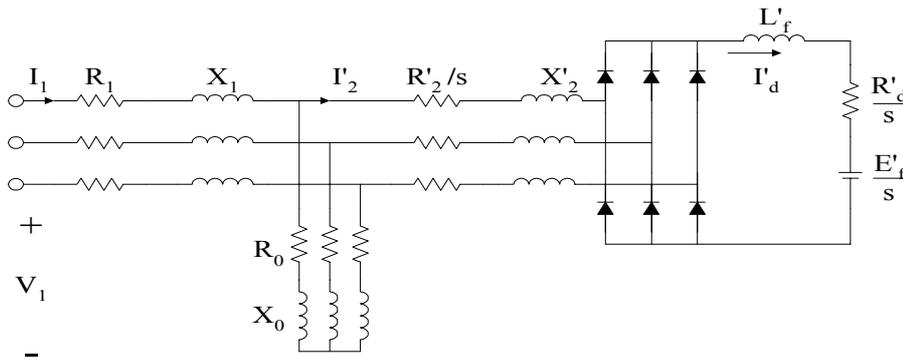


Fig. 2 Circuit model of induction motor using rectifier circuit in rotor side

V_1 : 유도전동기의 1차 단자 상 전압

R_1, R_2 : 1차, 2차 1상당의 권선 저항

X_1, X_2 : 1차, 2차 1상당의 권선 누설 리액턴스

R_0 : 1상당의 무부하손의 등가 저항

X_0 : 1상당의 여자 리액턴스

I_d : 직류 평균 전류

I_1, I_2 : 1차, 2차 전류

n : 권수비

s : 슬립

E_f : 정류기 전압강하

R_f : 평활 리액터의 저항

L_f : 평활 리액터의 인덕턴스

R_{ex} : 2차 삼입저항

R_d : $R_f + R_{ex}$

Fig. 2의 1상당 회로모델은 Fig. 3과 같고 이로부터 1차 회로와 Thevenin 등가 회로 모델로 치환하면 Fig. 4와 같다.

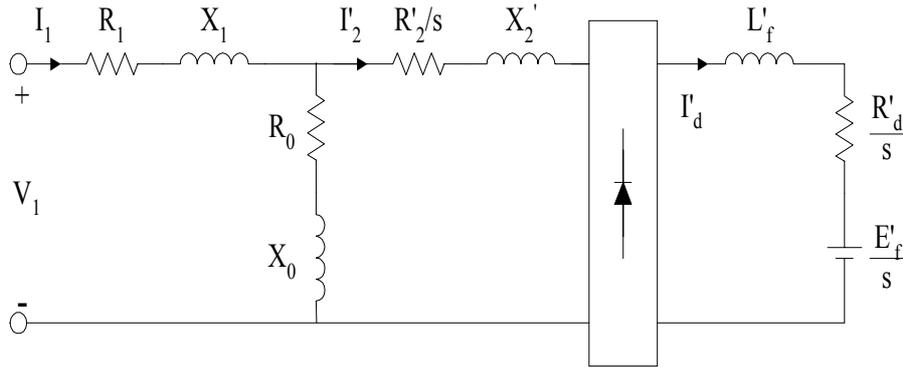


Fig. 3 Equivalent Circuit model per phase

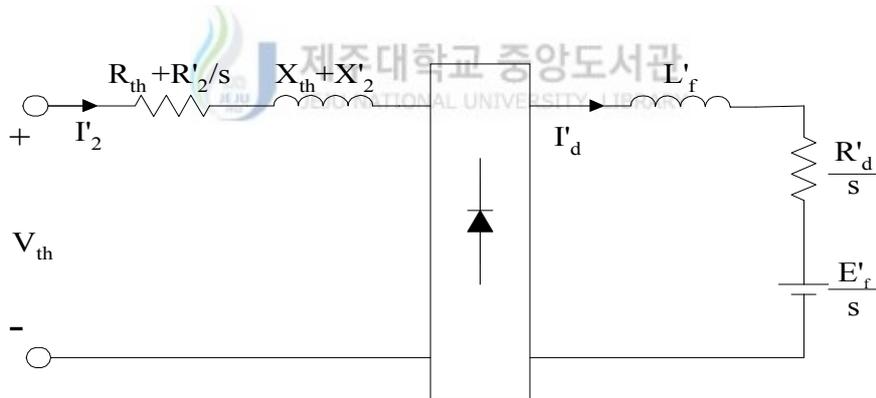


Fig. 4 Thevenin equivalent circuit model

Fig. 3에서 $Z_1 = R_1 + jX_1$, $Z_0 = R_0 + jX_0$ 라 놓으면 Fig. 4에서

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} = \frac{Z_1 Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (2-1)$$

$$V_{th} = \frac{Z_0}{Z_1 + Z_0} V_1 \quad (2-2)$$

이다.

Fig. 4에서 교류측에 리액턴스 성분이나 저항성분을 무시한 경우의 직류 평균전압은

$$E_{do} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{th} \quad (2-3)$$

이고, 실제에는 교류측에 리액턴스 성분이 있으므로 전류의 중복각이 생긴다. 전류의 중복각은 리액턴스 성분만을 고려하여 구한 등가 중복각 u 를 사용하고 직류 평균 전류를 I_d 라 하면,

$$\cos u = 1 - \frac{2(X_{th} + X_2')I_d}{\sqrt{6}V_{th}} \quad (2-4)$$

이 되고 이식의 유도과정을 부록에 보였다. 리액턴스 성분에 의한 평균 직류 전압강하는

$$E_x = \frac{3}{\pi} (X_{th} + X_2')I_d \quad (2-5)$$

또한 교류측 저항성분에 의한 전압강하는 중복기간 이외에서는

$2(R_{th} + \frac{R_2'}{s})I_d$, 중복기간에서는 $(1 + \frac{1}{2})(R_{th} + \frac{R_2'}{s})I_d$ 가 되므로 저항분에 의한 직류 평균 전압강하 E_R 은

$$\begin{aligned} E_R &= \frac{1}{\pi/3} \left[\int_0^u (1 + \frac{1}{2})(R_{th} + \frac{R_2'}{s})I_d d\theta + \int_u^{\frac{\pi}{3}} 2(R_{th} + \frac{R_2'}{s})I_d d\theta \right] \\ &= (2 - 3\frac{u}{\pi})(R_{th} + \frac{R_2'}{s})I_d \end{aligned} \quad (2-6)$$

가 된다.

정류기의 순전압강하 E_f 는 직류측 회로에서 정전압원으로 볼 수 있으므로 이상의 결과로부터 I_d 는

$$I_d = \frac{E_{do} - \frac{nE_f}{s}}{\frac{3}{\pi}(X_{th} + X_2') + (2 - 3\frac{u}{\pi})(R_{th} + \frac{R_2'}{s}) + \frac{R_d'}{s}} \quad (2-7)$$

으로 구할 수 있다.

중복각 u 는 식(2-4)와 식(2-7)을 연립하여 구할 수 있다.



2.3 교류회로 모델과 특성식

2.3.1 Sen의 방법

Fig. 1의 회로를 해석하기 위하여 Sen의 5소자 교류회로 모델을 Fig. 5에 보였고 R_r' 과 R_h' 은 다음과 같이 결정된다.

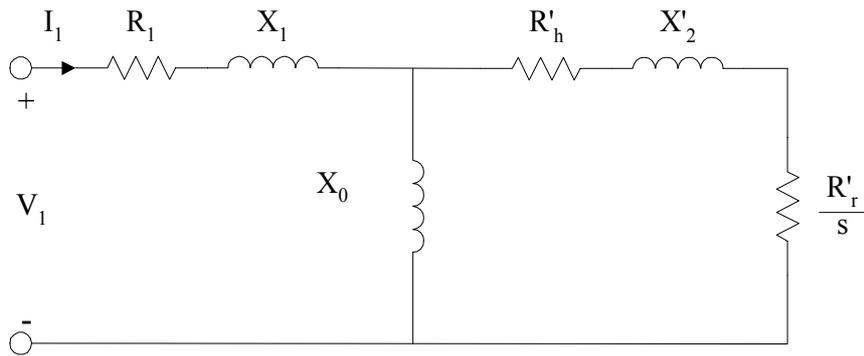


Fig. 5 Per-phase 5 elements AC circuit model

직류 평균 전류 I_d 와 회전자 실효전류 I_2 는 근사적(Sen,1975)으로 다음과 같다.

$$I_2^2 \approx \frac{2}{3} I_d^2 \quad (2-8)$$

직류측 전력손실은

$$P = \frac{1}{3} I_d^2 (R_f + R_{ex}) \quad (2-9)$$

이다. (2-8)식의 I_d 를 (2-9)식에 대입하여 교류회로 모델의 회전자 각상의 저항 R_e 를 구하면

$$R_e = 0.5(R_f + R_{ex}) \quad (2-10)$$

이 된다.

회전자 각상의 회전자 입력 P_2 는

$$P_2 = V_2 I_{21} \cos \theta_2 = R_2 I_2^2 + 0.5(R_f + R_{ex}) I_2^2 + P_m \quad (2-11)$$

가 된다. 기계출력 P_m 은 $P_m = [R_2 + 0.5(R_f + R_{ex})] I_{21}^2 (1-s)/s$ 으로 주어지고

$$I_{21} = \frac{3}{\pi} I_2 \quad (2-12)$$

이므로, P_2 는

$$P_2 = \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right) [R_2 + 0.5(R_f + R_{ex})] I_2^2 + [R_2 + 0.5(R_f + R_{ex})] \frac{I_2^2}{s} \quad (2-13)$$

이 된다.

그러므로 1상당 교류회로 모델에서

$$R_r' = [R_2 + 0.5(R_f + R_{ex})] n^2 \quad (2-14)$$

$$R_h' = R_r' \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right) \quad (2-15)$$

로 대표할 수 있다.

여기서 R_h' 는 정류에 의한 고조파 손실을 대표한다.

회전자측 임피던스 Z_2 는

$$Z_2 = R_h' + \frac{R_r'}{s} + jX_2' \quad (2-16)$$

이므로, 1차와 2차 전류 I_1 과 I_2 는

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_1}} \quad (2-17)$$

$$I_2 = I_1 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \quad (2-18)$$

가 된다.

또한 1차 입력 P_1 과 역률 pf 는

$$P_1 = 3 I_1^2 \operatorname{Re}\left(Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_2}\right) \quad (2-19)$$

$$pf = \cos \theta_1 = \cos \left(\tan^{-1} \frac{Im(I_1)}{Re(I_1)} \right) \quad (2-20)$$

그리고, 2차 입력 P_2 , 기계출력 P_m 과 토크 T 는

$$P_2 = 3 I_2^2 Re(Z_2) \quad (2-21)$$

$$P_m = P_2 - 3 I_2^2 (R_h' + R_r') \quad (2-22)$$

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (2-23)$$

이며, 여기서 ω 는 기계각속도이다.

2.3.2 제안한 방법

Fig. 1의 회로를 해석하기 위하여 교류회로 모델을 Fig. 6에 보였고 R_r' 과 R_h' 은 다음과 같이 결정된다.

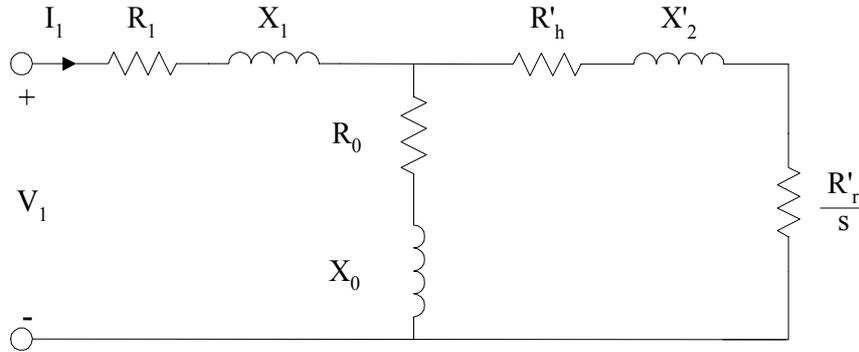


Fig. 6 Per-phase 6 elements AC circuit model

Fig. 3에서 직류전류 I_d 는 회전자 실효치 전류 I_2 와 다음과 같은 관계가 있다.

$$I_2^2 = \frac{2}{3} \left(1 - \frac{u}{2\pi}\right) I_d^2 \quad (2-24)$$

직류측 전력손실은

$$P_d = \frac{1}{3} I_d^2 R_d \quad (2-25)$$

이다. (2-24)식을 (2-25)식에 대입하면 회전자 각상의 저항은 교류회로 모델에서 다음 식으로 대표된다.

$$R_e = \frac{R_d}{2\left(1 - \frac{u}{2\pi}\right)} \quad (2-26)$$

회전자 각상에서의 회전자입력 P_2 는

$$P_2 = V_2 I_{21} \cos \theta_2 = R_2 I_2^2 + R_e I_2^2 + P_m \quad (2-27)$$

이고, 여기서 V_2 는 2차 전압, I_{21} 은 2차 전류의 기본파 전류, θ_2 는 V_2 과

I_{21} 사이의 위상각이며 P_m 은 기계출력이다.

$$P_m = (R_2 + R_e) I_{21}^2 (1-s)/s \quad (2-28)$$

으로 주어지고

$$I_{21} = \frac{3}{\pi} I_2 \quad (2-29)$$

이므로

$$P_2 = \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right)(R_2 + R_e) I_{21}^2 + (R_2 + R_e) I_{21}^2 \frac{1}{s} \quad (2-30)$$

이 된다.

그러므로 1상당 교류회로 모델에서

$$R_r' = (R_2 + R_e)n^2 \quad (2-31)$$

$$R_h' = R_r' \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right) \quad (2-32)$$

으로 대표할 수 있다.

여기서 R_h' 는 정류에 의한 고조파 손실을 대표한다.

특성식은 전절의 (2-16)식에서 (2-23)식과 같다.



Ⅲ. 수치해석 및 검토

회전자회로에 정류회로를 가지는 유도전동기를 제안한 교류회로 모델에 의하여 해석하고 그 타당성을 검증하기 위하여 정격전압 208[V], 정격전류 1.3[A], 정격출력 175[W]의 4극 권선형 유도전동기에 대하여 정수측정시험과 부하시험을 하였다. 제작회사에서 제공한 회로정수와 측정에 의한 회로정수(좌종근,1998)를 Table 1에 보였다.

Table 1 Circuit model parameters

Parameter (Ω) Methods	R ₁	X ₁	R ₂	X ₂	R ₀	X ₀
Manufacturer's data	12.5	8.8	3.9n ²	8.8	-	180
Proposed method	12.07	10.17	3.88n ²	10.59	5.92	142.56

$$n = 516/264 \quad E_f = 1.6 \text{ [V]} \quad R_f = 5.6 \text{ [}\Omega\text{]} \quad R_{ex} = 11.8 \text{ [}\Omega\text{]}$$

Table 2, 3 그리고 Fig. 7, 8은 외부저항이 연결되었을 때이며, Table 4, 5 그리고 Fig. 9, 10은 외부저항이 단락 되었을 때 입력전류와 출력 토오크를 측정치 및 Sen의 해석식과 제안한 모델에 의해 해석한 결과를 나타내고 있다.

제안한 방법에 의한 Table 2, 4 그리고 Fig. 7, 9에서 측정범위에서의 전류의 오차가 최대 7.1% 최소 0%의 범위 내에 있고 Table 3, 5 그리고 Fig. 8, 10에서 토오크는 슬립이 높을 때 오차가 낮지만 슬립이 낮을수록 높게 나타나고 있다. 제안한 방법에 의한 입력전류는 실측치와 잘 일치하고 있으며 출력 토오크도 해석결과가 측정치와 같은 변화를 가지며 비교적 잘 접근함을 알 수 있다.

이 결과와 Table 2~5 그리고 Fig.7~10에서 보듯이 Sen의 방법보다 제안한 방법의 결과가 실측치에 비교적 잘 일치하고 있으므로 회전자에 정류 회로를 가지는 유도전동기의 하나의 해석방법으로 타당함을 알 수 있다.



Table 2. Input current of the system with external resistance in rotor side

Slip \ Input current (A)	Measured Value	Proposed Method	Sen's Method
0.06056	0.82	0.805	0.660
0.12667	0.85	0.827	0.690
0.16778	0.91	0.86	0.727
0.225	0.93	0.91	0.795
0.330	1.07	1.028	0.940
0.38444	1.16	1.09	1.020
0.44389	1.25	1.167	1.110
0.50389	1.33	1.242	1.200
0.5511	1.40	1.30	1.270

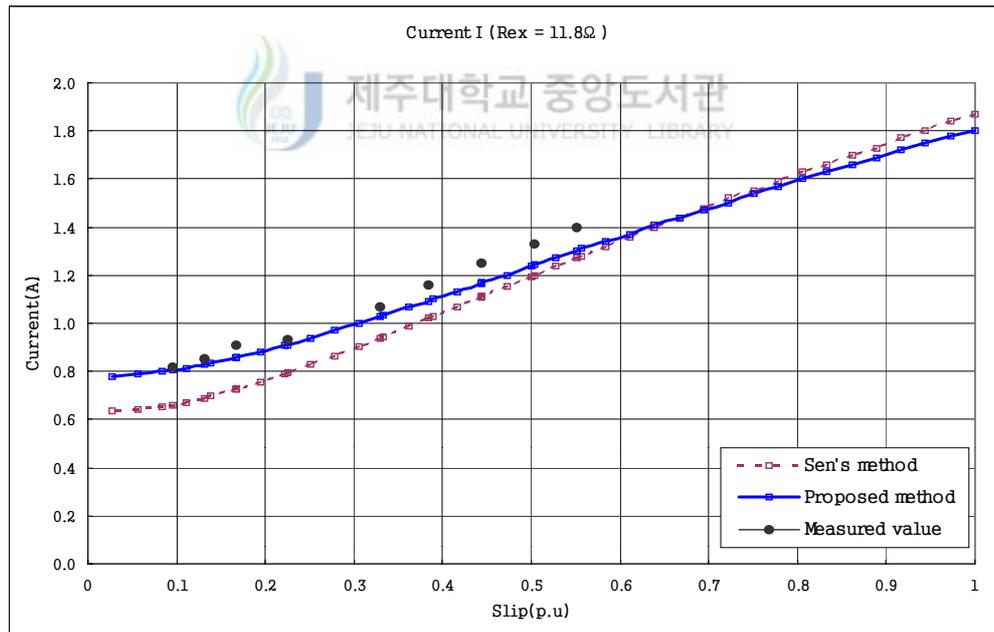


Fig. 7 Input current of the system with external resistance in rotor side

Table 3. Output torque of the system with external resistance in rotor side

Slip \ Output torque (N · m)	Measured Value	Proposed Method	Sen's Method
0.09556	0.01	0.360	0.387
0.13111	0.15	0.480	0.520
0.16778	0.28	0.600	0.650
0.2250	0.50	0.770	0.840
0.3300	0.84	1.040	1.140
0.38444	0.99	1.170	1.284
0.44389	1.12	1.295	1.425
0.50389	1.26	1.410	1.560
0.55111	1.36	1.490	1,650

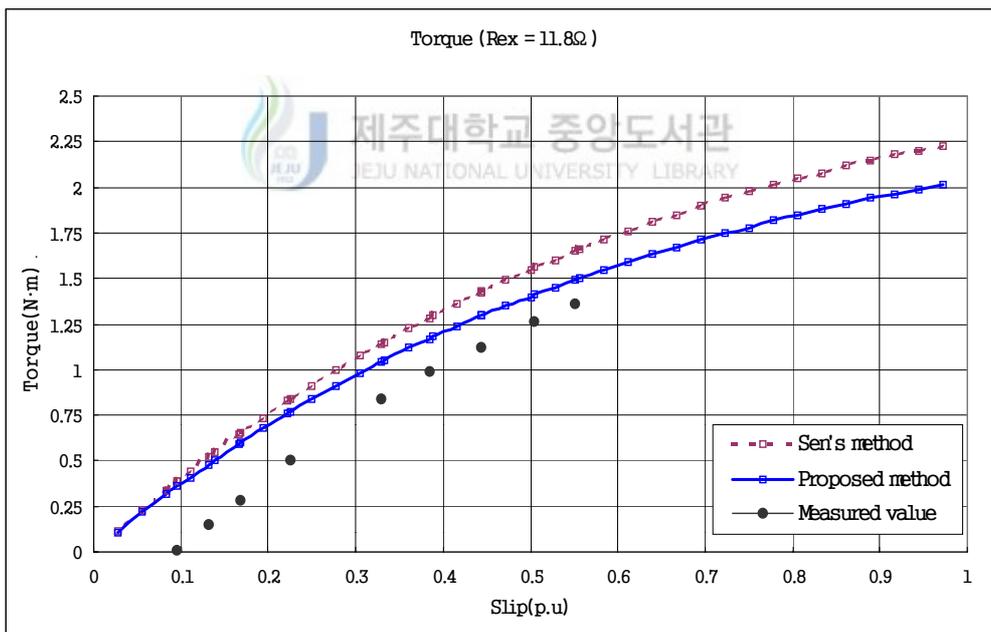


Fig. 8 Output torque of the system with external resistance in rotor side

Table 4. Input current of the system without external resistance in rotor side

Slip \ Input current (A)	Measured Value	Proposed Method	Sen's Method
0.06056	0.82	0.82	0.67
0.12667	0.93	0.93	0.82
0.16833	1.01	1.03	0.93
0.22556	1.12	1.17	1.09
0.33333	1.51	1.44	1.41
0.400	1.58	1.60	1.59
0.44444	1.67	1.71	1.71
0.49778	1.76	1.82	1.84
0.57056	1.86	1.98	2.01

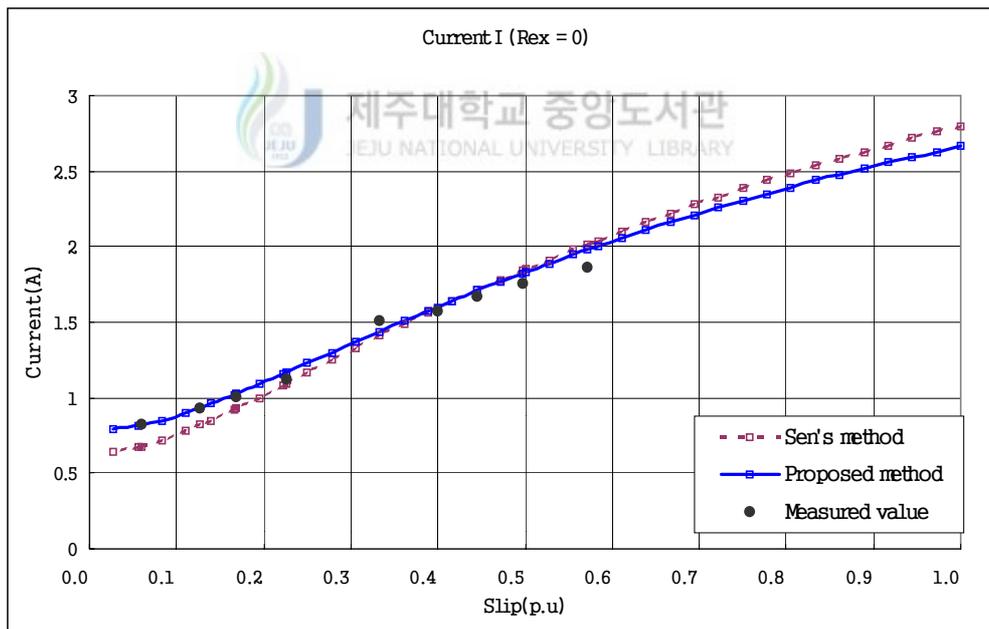


Fig. 9 Input current of the system without external resistance in rotor side

Table 5. Output torque of the system without external resistance in rotor side

Slip \ Output torque (N · m)	Measured Value	Proposed Method	Sen's Method
0.06056	0.010	0.433	0.460
0.12667	0.470	0.835	0.890
0.16833	0.725	1.057	1.140
0.22556	1.040	1.325	1.430
0.33333	1.495	1.730	1.870
0.400	1.670	1.925	2.090
0.44444	1.750	2.035	2.210
0.49778	1.850	2.150	2.335
0.57056	1.940	2.277	2.480

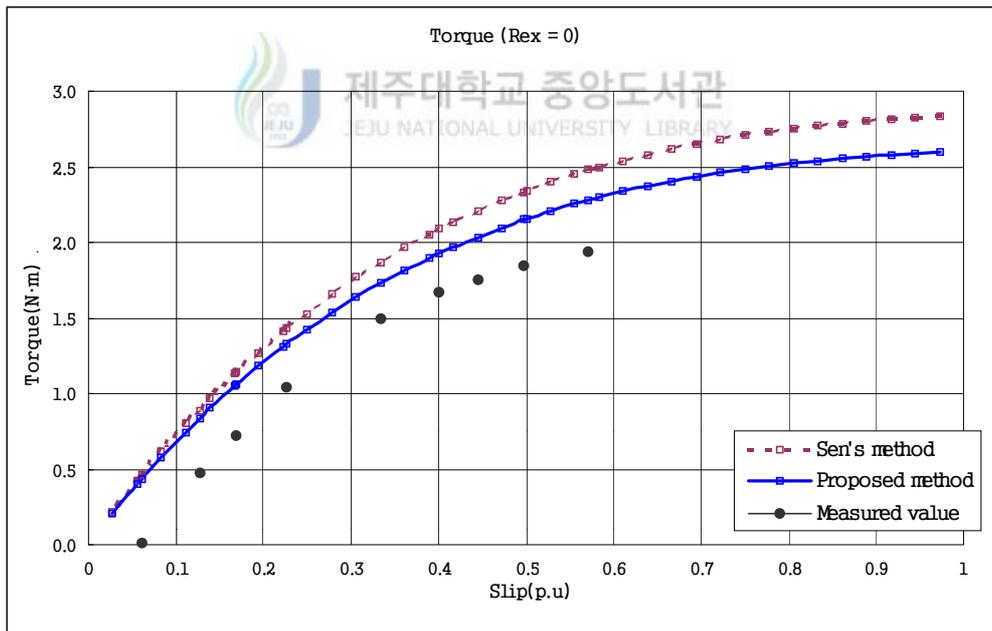


Fig. 10 Output torque of the system without external resistance in rotor side

IV. 결 론

6소자 교류등가회로 모델을 제안하여 회전자에 정류회로를 가지는 유도전동기의 특성을 해석하였다. 해석을 위해서 정류기의 전압강하와 전류 중복각에 의한 직류회로의 저항의 영향을 고려하여 간결하게 해석할 수 있는 방법을 제시하였다.

방법의 타당성을 검증하기 위해서 제안한 방법과 제작회사에서 제공한 회로정수를 정류기 전압강하와 중복각을 고려하지 않은 Sen의 5소자 교류등가 회로 모델을 이용하여 해석하고 실측치와 비교 검토하였다.

그 결과 Sen의 방법보다 제안한 방법의 결과가 실측치에 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러므로 본 해석방법이 회전자에 정류회로를 가지는 유도전동기의 해석방법으로 타당함을 알 수 있다.



참고문헌

Hori, T., 1967, "Characteristics of Secondary Excitation of Induction Motor with Rectifier Circuit", *IEEJ*, Vol. 87, No. 9, pp. 1797-1805.

조용철, 좌종근, 1998, "유도기 등가회로정수의 정밀산정", 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제 9권, 1호, pp. 156-162.

Jones, V. H. and Bonwick, W. J., 1975, "Three-phase bridge rectifiers with complex source impedance", *Proc. IEE*, Vol. 122, No. 6, pp. 630-636.

Rashid, M. H., 1988, *Power Electronics*, Prentice Hall Inc., pp. 349-356.

Sakui, M. and Fujita, H., 1978, "Characteristics of Wound Rotor Induction Motor using Rotor Chopper Control", *IEEJ* Vol. 98, No. 12, pp. 947-954.

Sakui, M., Yanase, A. and Fujita, H., 1979, "A Method for Determining Equivalent Circuit of Induction Motor, Considering Rectifier Circuit", *IEEJ*, Vol. 99, No. 10, pp.693.

Sakui, M., Yanase, A. and Fujita, H., 1980, "A Simplified Analysis of Steady State Characteristics of 3 Phase Bridge Rectifier Circuit with Source Impedance", *IEEJ*, Vol. 100, No. 3, pp. 186.

Sakui, M. and Fujita, H., 1980, "A Simplified Steady State Analysis of Induction Motor Using Rectifier Circuit in the Rotor Circuit by Equivalent Circuit Method", *IEEJ*, Vol. 100, No. 11, pp. 689-696.

Sen, P. C. and Ma, K. H. J., 1975, "Rotor Chopper Control for Induction Motor Drive" : TRC Strategy, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-11, No. 1, pp. 43-49.

부 록

◆ 3상 브리지정류회로의 중복각

3상 브리지 정류회로는 Fig. 11에 보이는 바와같이 정류기 6개를 사용하여 6상정류회로와 같은 직류전압 파형을 얻는 것이다. 지금 각상 전원전압을 v_u, v_v, v_w , 전원측의 저항성분을 R , 리액턴스성분을 X 라 한다. 직류회로의 평활리액터의 인덕턴스 L_f 는 충분한 크기를 가지며 직류전류 I_d 는 완전히 평활 하게 되고 정류기는 이상적인 특성을 갖는 것으로 한다.

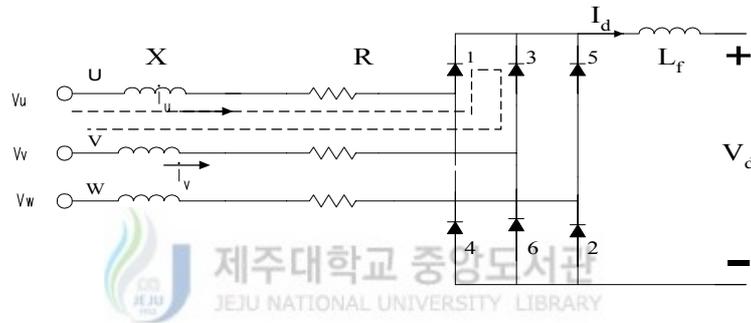


Fig. 11 Three phase bridge circuit

그림에서

$$v_u = \sqrt{2} V \cos(\theta + \frac{\pi}{3}), \quad v_v = \sqrt{2} V \cos(\theta - \frac{\pi}{3}), \quad (A-1)$$

라고 하면

$$v_u - v_v = -\sqrt{6} V \sin \theta \quad (A-2)$$

이 되고, u 상전압에 의해 직류전류가 흐르고 있는 경우, u 상에는 $I_d R$ 의 저항강하를 일으키기 때문에 Fig. 12에서와 같이 u 상에서 v 상으로의 전류(轉流)는 $\theta = 0$ 이 아니고 $\theta = -u_1$ 에서 시작된다. 따라서

$$I_d R = -\sqrt{6} V \sin \theta = \sqrt{6} V \sin u_1 \quad (\text{A-3})$$

가 성립한다.

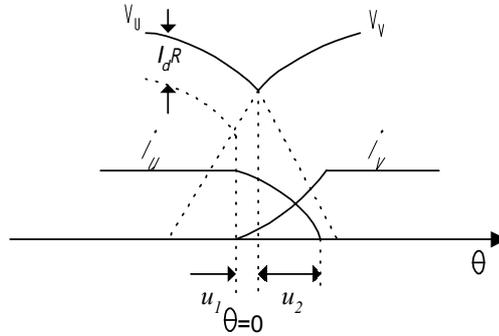


Fig. 12 Overlap angle

$\theta = -u_1$ 까지 직류전류는 정류기 1의 전류 i_u 가 단독으로 전부 부담하고 있으나 $\theta = -u_1$ 에서 i_v 가 흐르기 시작하여 $i_u = 0$ 이 될 때까지 전류(轉流) 한다.

전류(轉流)기간의 각 양극전류를 i_u, i_v 라 하면

$$I_d = i_u + i_v \quad (\text{A-4})$$

가 되고, Fig. 11의 파선의 회로가 되므로

$$v_u - X \frac{di_u}{d\theta} - Ri_u = v_v - X \frac{di_v}{d\theta} - Ri_v \quad (\text{A-5})$$

(A-2), (A-4), (A-5)를 정리하면

$$\frac{di_u}{d\theta} + \frac{i_u}{T} = \frac{I_d}{2T} - I_s \frac{\sin \theta}{\sin \phi} \quad (\text{A-6})$$

여기서,

$$T = \tan \phi = \frac{X}{R} \quad (\text{A-7})$$

$$I_s = \sqrt{6} \sin \phi / 2X \quad (\text{A-8})$$

이고, (A-6)식을 $\theta = -u_1$ 에서 $i_u = I_d$ 로 하여 풀면.

$$i_u = \{ 1 + e^{-(u_1 + \theta)/T} \} \frac{I_d}{2} - I_s \{ \sin(\theta - \phi) + e^{-(u_1 + \theta)/T} \sin(u_1 + \phi) \} \quad (A-9)$$

이 되고, 전류(轉流)는 $i_u = 0$ 에서 끝나므로 (A-9)식을 0 으로 하는 θ 를 u_2 로 놓으면 다음식이 성립한다.

$$\{ 1 + e^{-(u_1 + u_2)/T} \} \frac{I_d}{2} = I_s \{ \sin(u_2 - \phi) + e^{-(u_1 + u_2)/T} \sin(u_1 + \phi) \} \quad (A-10)$$

따라서, 중복각 u 는

$$u = u_1 + u_2 \quad (A-11)$$

로 주어진다.

(A-8) 식에서 $\phi = \frac{\pi}{2}$, ($T = \infty$) 라고 놓은 I_s 를 I_{sm} 으로 표시하면

(A-3), (A-7), (A-8) 식에서부터

$$\frac{I_d}{I_{sm}} = 2T \sin u_1 \quad (A-12)$$

가 된다. 또 $R=0$ 인 경우는 $u_1=0$, $u=u_2$ 가 되므로 (A-10)에서

$$\cos u = 1 - \frac{I_d}{I_{sm}} \quad (A-13)$$

이 된다.

이상에서 구한 식에서 임의로 T의 값을 결정하면 ϕ 의 값을 (A-7)에서 구할 수 있고 (A-3), (A-8)식의 I_d , I_s 를 (A-10)식에 대입하면 (A-10)식을 u_1 , u_2 만의 함수가 되고 (A-11)식에서 u 를 구할 수 있다.

감사의 글

새로운 울타리에서 자신을 찾을 수 있을까 하는 마음으로 시작 했었는데 이렇게 매듭을 지을 수 있게 됨을 무척 감사한 마음으로 생각하고 있습니다.

지난 2년 반 동안 저의 논문이 결실을 맺기까지 물심양면으로 도움을 주시고 학문탐구의 길을 열어주신 좌종근교수님께 고개 숙여 감사드리며, 그동안 새로운 학문에 접할 수 있게 많은 가르침을 주신 오성보교수님, 이개명교수님, 김일환교수님, 김세호교수님, 김호찬교수님께 감사의 뜻을 전합니다. 항상 바쁜 가운데서도 많은 도움을 준 조용철조교님, 그리고 업무에 시달리면서도 많은 시간을 배려 해준 PMC센터에 근무하고 있는 직원 여러분에게도 감사를 드립니다.



여기오기까지 나에게 희망과 용기를 주었던 사랑하는 아내 그리고 아빠. 언제까지 바빠요? 하며 따뜻한 미소로 나를 기다려준 사랑하는 두 아들 지원, 지성이와 결실의 기쁨을 맺기까지 도움을 주신 모든 분들께 이 논문을 바칩니다.