

회전자에 정류회로를 가지는 유도전동기의 교류회로 모델에 의한 해석

문 경 주* · 조 용 철** · 좌 종 근***

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

Kyung-Joo Moon*, Young-Cheol Jo** and Chong-Keun Jwa***

ABSTRACT

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.

Key words : Rotor rectifier circuit, Over lap angle, Six element ac model

1. 서론

권선형 유도전동기의 회전자 전압제어 또는 슬립전력제어¹⁾ 방식으로는 종래부터 저항초퍼방식, 정자크래머방식과 정지셀비어스방식이 널리 사용되고 있으며 회전자회로에는 정류회로에 의하여 슬립전력을 제어하여 속도를 제어하고 있다.

이와 관련하여 Hori²⁾는 1차측으로 환산한 3상동가회로에 의하여 정지2차여자방식의 특성을 저항분을 고려하여 정류회로의 중복각과 유효전류와의 관계를 명확히 하여 해석하였다. Sen 등³⁾은 저항초퍼제어방식을 2차측으로 환산한 직류모델과 1차측에서 계산할 수 있는 교류모델을 가지고 해석하였고 Sakui 등⁴⁾은 회전자초퍼제어방식을 정류기 순전압강하는 물론 중복기간의 전류에 의한 권선저항의 전압강하를 고려하여 해석하였다. Jones 등⁵⁾과 Sakui 등⁶⁾은 교류측에 임피던스를 가지는 3상브리지 정류회로의 계산방법을 제시하였다. 또한 Sakui 등⁷⁾과 Sakui 등⁸⁾은 2차측에 정류회로를 가지는 유도전동기의 교류모델을 1차측으로 환산한 여자회로와 부하회로로 분리하여 중복

* 제주대학교 산업대학원
Graduate School of Industry, Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 대학원
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

*** 제주대학교 전기공학과
Dept. of Electrical Eng., Cheju Nat'l Univ.

각은 물론 이로 인한 전류성분의 영향도 고려하여 해석하였다.

이들 중에 교류회로모델로는 5소자회로³⁾와 6소자 회로모델이 사용되고 있으나 후자의 경우는 3상등가 회로²⁾를 사용하거나 1상당 등가회로를 여자회로와 부하회로로 나누어 해석⁷⁻⁸⁾하여 합성하고 있으므로 계산과정이 다소 복잡하다.

본 연구에서는 1차회로로 환산한 1상당 6소자 교류 회로모델을 제안하고 정류기의 전압강하와 중복각에 의한 직류회로의 저항의 영향을 고려하여 간결하게 해석할 수 있는 방법을 제시하였다. 방법의 타당성을 검증하기 위하여 제작회사에서 제공한 회로정수를 5 소자 교류모델³⁾에 적용하고 측정에 의한 회로정수⁹⁾를 제안한 6소자 교류회로모델에 적용하여 해석하여 실측치와 비교 검토하였다.

II. 해석이론

2.1 회로의 구성

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

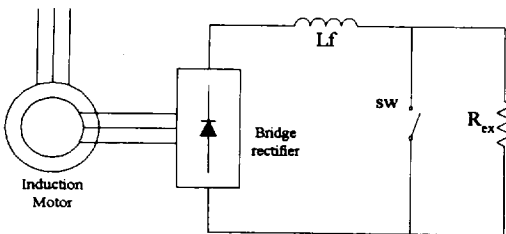


Fig. 1 Schematic for rotor rectifier circuit for induction motor

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.

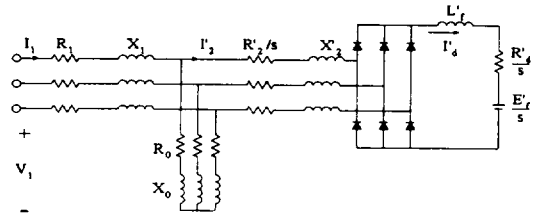


Fig. 2 Circuit model of induction motor using rectifier circuit

- V_1 : 유도전동기의 1차 단자 상전압
- R_1, R_2 : 1차, 2차 1상당의 권선저항
- X_1, X_2 : 1차, 2차 1상당의 권선 누설리액턴스
- R_0 : 1상당의 무부하손의 등가저항
- X_0 : 1상당의 여자리액턴스
- L_d : 직류 평균전류
- 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 삽입저항
- R_d : $R_f + R_{ex}$

Fig. 2의 1상당 회로모델은 Fig. 3과 같고

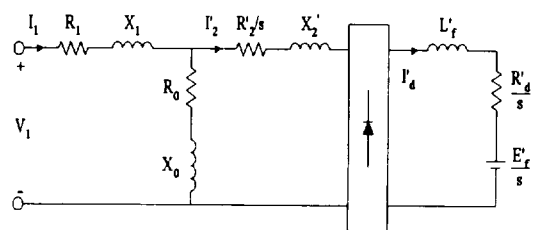


Fig. 3 Circuit model per phase

이로부터 1차 회로와 Thevenin 등가회로모델로 차환하면 Fig. 4와 같다

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

으면 Fig. 4에서

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

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

이다.

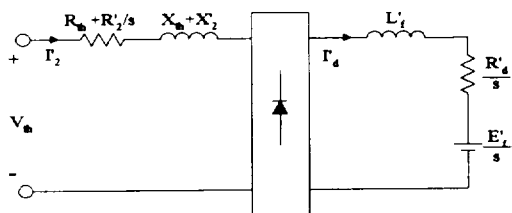


Fig. 4 Thevenin equivalent circuit model

Fig. 4에서 교류측에 리액턴스 성분이나 저항성분을 무시한 경우의 직류평균전압은

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

이고, 실제에는 교류측에 리액턴스성분이 있으므로 전류의 중복각이 생긴다. 전류의 중복각은 리액턴스 성분만을 고려하여 구한 등가중복각 u 를 사용하고 직류 평균전류를 I_d 라 하면,

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

이 된다. 리액턴스성분에 의한 평균직류 전압강하는

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

또한 교류측 저항성분에 의한 전압강하는

$$E_R = (2 - 3\frac{u}{\pi})(R_{th} + \frac{R_2'}{s})I_d \quad (6)$$

가 된다. 정류기의 순전압강하 E_r 는 직류측 회로에서 정전압원으로 볼 수 있으므로 이상의 결과로부터 I_d 는

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

으로 구할 수 있다. 중복각 u 는 식(4)와 식(7)을 연립하여 구할 수 있다.

2.3. 교류회로모델과 특성식

Fig. 1의 회로를 해석하기 위하여 교류회로모델을 Fig. 5에 보였고 R_r' 과 R_h' 는 다음과 같이 결정한다.

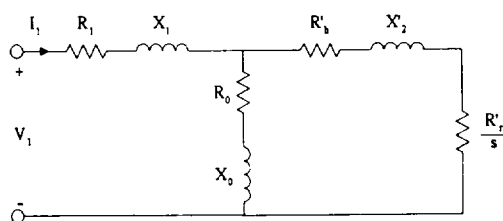


Fig. 5 Per-phase AC circuit model

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

$$I_2^2 = \frac{2}{3}(1 - \frac{u}{2\pi})I_d^2 \quad (8)$$

직류측 전력손실은

$$P_d = \frac{1}{3} I_d^2 R_d \quad (9)$$

이다. (8)식을 (9)식에 대입하면 회전자 각상의 저항은 교류모델회로에서 다음 식으로 대표된다.

$$R_e = \frac{R_d}{2(1 - \frac{u}{2\pi})} \quad (10)$$

회전자 각상에서의 회전자입력 P_2 는

$$P_2 = V_2 I_{21} \cos \theta_2 = R_2 I_2^2 + R_e I_2^2 + P_m \quad (11)$$

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.

$$P_m = (R_2 + R_e) I_{21}^2 (1-s)/s \quad (12)$$

으로 주어지고

$$I_{21} = \frac{3}{\pi} I_2 \quad (13)$$

이므로

$$P_2 = \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right)(R_2 + R_e) I_{21}^2 + (R_2 + R_e) I_{21}^2 \frac{1}{s} \quad (14)$$

이 된다. 그러므로 1상당 교류회로 모델에서

$$R_r' = (R_2 + R_e)n^2 \quad (15)$$

$$R_h' = R_r' \left(\frac{\pi^2}{9} - 1\right) \quad (16)$$

으로 대표할 수 있다. 여기서 R_h' 는 정류에 의한 고조파 손실을 대표한다.

회전자측 임피던스 Z_2 는

$$Z_2 = R_h' + \frac{R_r'}{s} + jX_2' \quad (17)$$

이므로, 1차와 2차 전류 I_1 과 I_2 는

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_1}} \quad (18)$$

$$I_2 = I_1 \frac{Z_0}{Z_0 + Z_2} \quad (19)$$

가 된다. 또한 1차 입력 P_1 과 역률 pf 는

$$P_1 = 3 I_1^2 \operatorname{Re}\left(Z_1 + \frac{Z_0 Z_2}{Z_0 + Z_1}\right) \quad (20)$$

$$pf = \cos \theta_1 = \cos \left(\tan^{-1} \frac{\operatorname{Im}(I_1)}{\operatorname{Re}(I_1)}\right) \quad (21)$$

이다. 그리고 2차 입력 P_2 , 기계출력 P_m 과 토오크 T 는

$$P_2 = 3 I_2^2 \operatorname{Re}(Z_2) \quad (22)$$

$$P_m = P_2 - 3 I_2^2 (R_h' + R_r') \quad (23)$$

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (24)$$

이며, 여기서 ω 는 기계각속도이다.

III. 수치해석 및 검토

회전자회로에 정류회로를 가지는 유도전동기를 제안한 교류회로모델에 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 회로정수를 Table 1에 보였다.

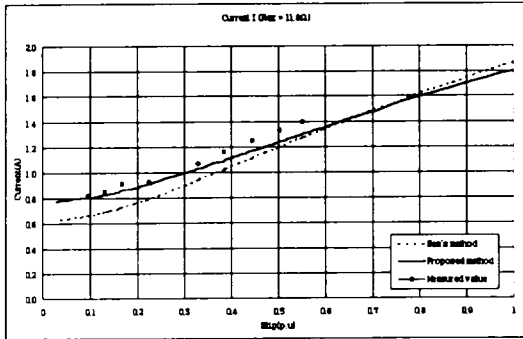
Table 1 Circuit model parameters

Parameter (Ω)	R1	X1	R2	X2	Rm	Xm
Methods						
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

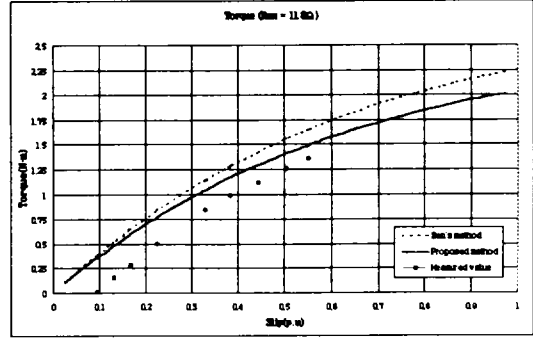
n = 516/264 $E_r = 1.6$ [V] $R_r = 5.6$ [Ω]
 $R_{ex} = 11.8$ [Ω]

Fig. 6은 정류기 외부저항 삼입시와 단락시의 부하 시험결과와 측정치 그리고 Sen의 해석식과 제안한 모델에 의한 해석식으로 계산한 입력전류와 출력토크의 결과를 보이고 있다. Fig. 6의 a)와 b)는 외부저항이 연결되었을 때의 입력전류와 출력토크를 그리고 Fig. 6의 c)와 d)는 외부저항이 단락되었을 때의 입력전류와 출력토크를 보였다.

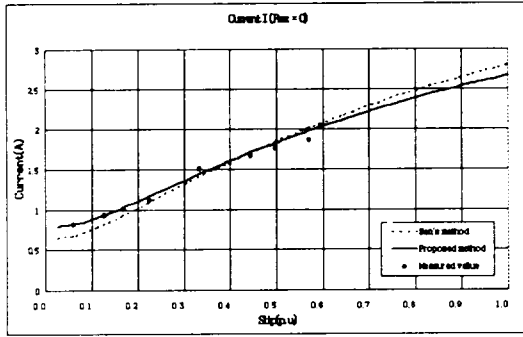
제안한 방법에 의한 Fig. 6의 a)와 c)에서 측정범위에서의 전류의 오차가 최대 7.1% 최소 0%의 범위 내에 있고 Fig. 6의 b)와 d)에서 토크는 슬립이 높을 때 오차가 낮지만 슬립이 낮을수록 높게 나타나고 있다. 제안한 방법에 의한 입력전류는 실측치와 잘 일치하고 있으며 출력토크도 해석결과가 측정치와



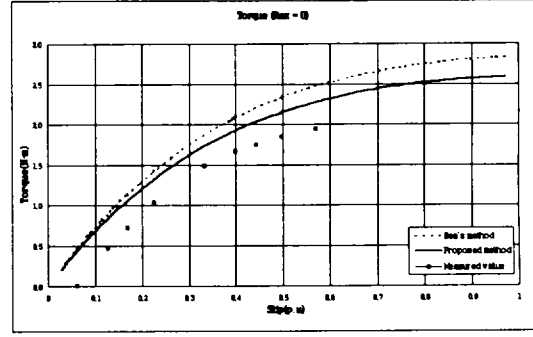
a) Input current when the external resistance is connected



b) Output torque when the external resistance is connected



c) Input current when the external resistance is shorted



d) Output torque when the external resistance is shorted

Fig. 6 Input current and Output torque of tested motor

같은 변화를 가지며 비교적 잘 접근함을 알 수 있다. 이 결과와 Fig. 6에서 보듯이 Sen의 방법보다 제안한 방법의 결과가 실측치에 비교적 잘 일치하고 있으므로 회전자에 정류회로를 가지는 유도전동기의 하나의 해석방법으로 타당함을 알 수 있다.

IV. 결 론

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

방법의 타당성을 검증하기 위해서 제안한 방법과 제작회사에서 제공한 회로정수를 정류기 전압강하와 증폭각을 고려하지 않은 Sen의 5소자 교류등가회로 모델에 적용하여 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

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

- 2) Hori, T., 1967, Characteristics of Secondary Excitation of Induction Motor with Rectifier Circuit, IEEJ, Vol. 87, No. 9, pp. 1797-1805
- 3) 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
- 4) Sakui, M. and Fujita, H., 1978, Characteristics of Wound Rotor Induction Motor using Rotor Chopper Control, IEEJ Vol. 98, No. 12, pp. 947-954
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 조용철, 좌종근, 1998, 유도기 등가회로정수의 정밀산정, 제주대학교 산업기술연구소 논문집, 제 9 권, 1호, pp. 156-162