

碩 士 學 位 論 文

多 樣 한 不 平 型 電 壓 이 印 加 된 3 相
誘 導 電 動 機 의 動 的 特 性 分 析



金 兌 翰

2004年 12月

多様な 不平型 電壓이 印加된 3相 誘導電動機의 動的特性 分析

指導教授 左 宗 根

金 兌 翰

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



2004年 12月

金兌翰의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2004年 12月

Analysis of Dynamic Characteristics of Three Phase Induction Motor Applied by Various Unbalanced Voltages

Tae-Han Kim

(Supervised by professor Chong-Keun Jwa)



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

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2004年 12月

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	ii
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
II. 기초 방정식	3
III. 시뮬레이션 및 분석	10
IV. 결 론	20
참고문헌	21

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Stator and rotor connection of an induction machine	3
Fig. 2	Flow of variables in induction motor simulation	11
Fig. 3	Dynamic characteristics, 3 Φ -balanced case with VUF=0[%] and $T_m=0$	12
Fig. 4	Dynamic characteristics, 3 Φ -OV case with VUF=4[%] and $T_m=0$	13
Fig. 5	Dynamic characteristics, 3 Φ -OV case with VUF=6[%] and $T_m=0$	14



LIST OF TABLES

Table 1	Comparison of starting time and min/max torque of 8 different unvalanced voltage cases	16
Table 2	Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and 1Φ -UV unvalance cases	18
Table 3	Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and same positive sequence voltage cases	18



SUMMARY

In this paper, the dynamic characteristics of a three phase induction motor which is applied by various unbalanced voltages are simulated and analyzed. The voltage equations and torque equation in the dq stationary reference frame for the three phase star connected induction motor are used in this analysis. MATLAB and SIMULINK are employed as a simulation tool. The dynamic characteristics of speed and torque are simulated for various unbalanced voltages, that is, (1) cases with the same voltage unbalance factor(VUF) but different unbalanced voltages, (2) cases with only one unbalanced voltages but different degree of unbalance, and (3) cases with the same positive sequence voltage but different negative sequence voltages. The simulated results are compared and analyzed with each other, and also with the results of balanced voltage.

I. 서 론

3상 대칭유도전동기는 평형 3상전압으로 운전하는 것이 원칙이지만 실제로 배전선에 접속하여 사용할 때 전동기에 인가되는 단자전압은 불평형이 되는 것이 일반적이다. 이 때 전압 불평형의 정도는 보통 아주 적으므로 이것이 전동기에 미치는 영향은 적으나 불평형의 정도가 커지면 이에따라 영향도 커진다. 이의 영향으로 출력이 감소하고 동손의 증가로 온도가 상승하는 등 전동기 운전성능이 저하하게 된다.

이의 중요성에 따라 정상상태 해석으로 Williams(1954)는 역상분 전류에 의한 손실의 변화와 불평형 전압으로 인한 부가손실의 전동기 부하변화에 따른 영향 등을 분석하였다. Linders(1972)는 전동기 손실과 역상분 전압사이의 상관관계가 있으며 불평형 전압이 전동기 수명단축의 원인이 되는 것을 지적하였다. Lee(1999)는 전동기의 실부하 시험을 통하여 다양한 불평형 전압이 인가될 때 전동기 성능에 미치는 영향을 조사하고 관련규정, 전동기의 감소율, 그리고 온도상승 곡선이 전압 불평형율은 물론 정상분 전압이 크기도 기초가 되어야 함을 제시하였다.

동적해석으로 Krause 와 Thomas(1965)는 dq 임의 속도 좌표계로 표시한 대칭 유도기의 방정식을 사용하여 평형과 불평형 운전에 대한 2상과 3상 유도기의 동특성을 아날로그 컴퓨터로 시뮬레이션하였다. Krause(1987)는 고정자와 회전자 불평형 조건을 분리하여 고찰하였고 불평형 비정현파의 전압이 고정자와 회전자에 인가될 때의 특성을 해석하였다. Ong(1998)은 dq 정지좌표계를 사용하여 유도기의 운전방식에 따른 동특성을 MATLAB/SIMULINK로 프로그램하여 시뮬레이션하였다.

그러나 이들의 연구에서는 불평형 전압인가시의 동특성은 시뮬레이션되어 있으나 다양한 불평형 전압이 인가된 경우에 대한 특성은 분석되어 있지 않

다.

본 논문에서는 3상 성형결선된 대칭 3상 유도전동기에 대한 기초방정식을 dq 정지좌표계로 구성하고 시뮬레이션 도구로 MATLAB/SIMULINK를 사용한다. 다양한 불평형 전압이 전동기에 인가된 경우에 대한 속도와 토오크의 동특성을 시뮬레이션하고 이들의 결과들을 평형 전압이 인가된 결과는 물론 각 경우에 대해서도 서로 비교하여 분석한다.



II. 기초 방정식

3상 대칭유도기의 동적 시뮬레이션을 하기 위한 권선의 접속은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보듯이 대부분의 경우 고정자와 회전자는 3선 시스템이고 농형의 경우 회전자권선은 3선 시스템과 등가로 볼 수 있으므로 4선 시스템은 고려하지 않는다.

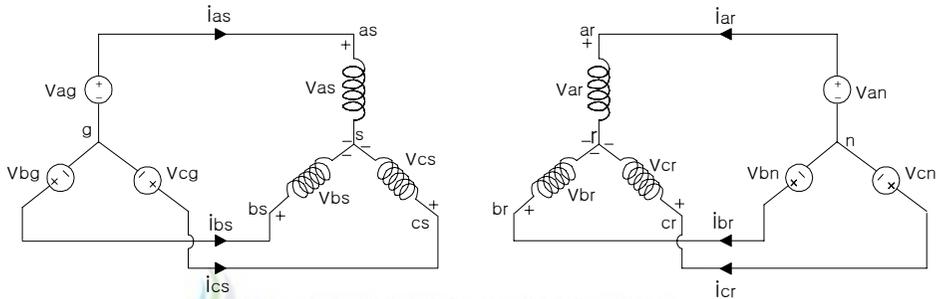


Fig. 1 Stator and rotor connection of an induction machine

Fig. 1에서 V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} 는 각상 고정자측 전원의 상전압을, V_{as}, V_{bs}, V_{cs} 는 각상 고정자 권선의 상전압을, V_{an}, V_{bn}, V_{cn} 은 각상 회전자측 상전압을, V_{ar}, V_{br}, V_{cr} 은 각상 회전자권선의 상전압을, i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 는 각상 고정자측 상전류를, 그리고 i_{ar}, i_{br}, i_{cr} 은 각상 회전자측 상전류를 표시한다.

3상 인가전압 V_{ag}, V_{bg}, V_{cg} 는 평형 전압일 수도 있고 불평형 전압이나 비정현파 전압일 수도 있다. Fig. 1에서 3상 고정자 권선의 상전압은

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= V_{ag} - V_{sg} \\
 V_{bs} &= V_{bg} - V_{sg} \\
 V_{cs} &= V_{cg} - V_{sg}
 \end{aligned} \tag{1}$$

이 되고, 여기서 V_{sg} 는 고정자 권선 중성점과 고정자측 전원 중성점 사이의 전압이다. 3상 3선 시스템만 고려하고 있으므로 영상분 전류 i_{os} 는 0이므로 $V_{sg}=0$ 이고 영상분 전압 V_{os} 도 0으로하여 기초방정식을 세운다.

고정자 전원의 상전압의 형태에 관계없이 정지 dq 좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V_{qs}^s &= \frac{2}{3} V_{as} - \frac{1}{3} V_{bs} - \frac{1}{3} V_{cs} \\ &= \frac{2}{3} V_{ag} - \frac{1}{3} V_{bg} - \frac{1}{3} V_{cg} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_{ds}^s &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{bs} + V_{cs}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{bg} + V_{cg}) \end{aligned}$$



이 되고, 여기서 위첨자 s 는 정지좌표계를 표시한다.

회전자 상전압을 같은 정지 dq 좌표계로 변환하기 위해서 먼저 고정자 측으로 환산된 상전압을 회전자의 a상축에 일치한 q 축을 갖는 회전자 속도좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V'_{qr} &= \frac{2}{3} V'_{ar} - \frac{1}{3} V'_{br} - \frac{1}{3} V'_{cr} \\ &= \frac{2}{3} V'_{an} - \frac{1}{3} V'_{bn} - \frac{1}{3} V'_{cn} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V'_{dr} &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V'_{br} + V'_{cr}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V'_{bn} + V'_{cn}) \end{aligned}$$

이 되고, 여기서 prime(')은 회전자측을 고정자로 환산된 것을, 그리고 윗첨자 r 은 회전자 속도좌표계를 표시한다.

다음에 정지좌표계로 변환하면

$$V'_{qr}{}^s = V'_{qr}{}^r \cos \Theta_r(t) + V'_{dr}{}^r \sin \Theta_r(t) \quad (4)$$

$$V'_{dr}{}^s = -V'_{qr}{}^r \sin \Theta_r(t) + V'_{dr}{}^r \cos \Theta_r(t)$$

이 되며, 여기서

$$\Theta_r(t) = \int_0^t w_r(t) dt + \Theta_t(t) \quad (5)$$

이다. 여기서 $w_r(t)$ 는 회전자의 각속도 이다.

위에서 구한 정지좌표계의 고정자와 회전자 전압은 부하토크와 입력으로 하여 정지좌표계의 전류를 구한다. 고정자 상전류는 역변환 행렬에서 Θ 를 0으로 하여 구하면

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_{qs}^s \\ i_{bs} &= -\frac{1}{2} i_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^s \\ i_{cs} &= -\frac{1}{2} i_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^s \end{aligned} \quad (6)$$

이 되고, 여기서 i_{qs}^s , i_{ds}^s 는 각각 고정자 상전류의 횡축과 직축성분이며 회전자 상전류는 먼저 정지좌표계의 전류를 회전자 속도좌표계로 변환하면

$$i'_{qr}{}^r = i'_{qr}{}^s \cos \Theta_r(t) - i'_{dr}{}^s \sin \Theta_r(t) \quad (7)$$

$$i'_{dr}{}^r = i'_{qr}{}^s \sin \Theta_r(t) + i'_{dr}{}^s \cos \Theta_r(t)$$

이 되며, 여기서 i_{qr} , i_{dr} 은 각각 회전자 상전류의 횡축과 직축성분이고 이들을 역변환 행렬에서 Θ 를 0으로하여 구하면

$$i'_{ar} = i'_{qr}{}^r$$

$$i'_{br} = -\frac{1}{2} i'_{qr}{}^r - \frac{\sqrt{3}}{2} i'_{dr}{}^r \quad (8)$$

$$i'_{cr} = -\frac{1}{2} i'_{qr}{}^r + \frac{\sqrt{3}}{2} i'_{dr}{}^r$$

이 된다.



정지좌표계에서의 3상 대칭유도기의 전압방정식은

$$V_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{qs}^s \quad (9)$$

$$V_{ds}^s = r_s i_{ds}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{ds}^s$$

$$V'_{qr}{}^s = r'_r i'_{qr}{}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi'_{dr}{}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi'_{qr}{}^s \quad (10)$$

$$V'_{dr}{}^s = r'_r i'_{dr}{}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi'_{qr}{}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi'_{dr}{}^s$$

으로 주어지고, 여기서 r_s, r_r 은 각각 고정자와 회전자 1상당 저항을, ω_b 는 기준 전기각속도를, Ψ_{qs}, Ψ_{qr} 은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교수의 횡축성분을, Ψ_{ds}, Ψ_{dr} 은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교수의 직축 성분을, 그리고 p 는 시간 미분연산자로 d/dt 를 표시한다.

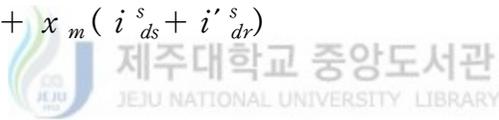
각 좌표축 성분의 자속쇄교수는

$$\Psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \quad (11)$$

$$\Psi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s)$$

$$\Psi_{qr}^s = x'_{lr} i_{qr}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \quad (12)$$

$$\Psi_{dr}^s = x'_{lr} i_{dr}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s)$$



으로 표시되고, 여기서 x_{ls}, x_{lr} 은 각각 고정자와 회전자의 1상당 누설리액턴스를, 그리고 x_m 은 여자리액턴스를 표시한다.

고정자와 회전자사이의 단위시간당 상호 자속쇄교수의 횡축성분과 직축성분을 Ψ_{mq} 와 Ψ_{md} 이라 하면

$$\Psi_{mq} = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \quad (13)$$

$$\Psi_{md} = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s)$$

이 된다. 또한

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \quad (14)$$

이러면 식 (11), (12) 과 식 (13)로부터

$$\Psi_{mq} = x_M \left(\frac{\Psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi'_{lr}{}^s}{x'_{lr}} \right) \quad (15)$$

$$\Psi_{md} = x_M \left(\frac{\Psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi'_{lr}{}^s}{x'_{lr}} \right)$$

가 된다.

유도기의 발생토크는



$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (16)$$

로 주어지고, 여기서 P 는 극수이다. 회전자의 운동방정식은

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_e + T_m - T_d \quad (17)$$

이며, 여기서 J 는 회전자와 회전자와 연결된 부하의 합성 관성모멘트이고, ω_{rm} 은 회전자의 기계각속도이며, 그리고 T_m 과 T_d 는 각각 외부인가 기계적토크와 제동토크이다.

이 식을 ω_r / ω_b 의 항이 포함 되도록 정리하면

$$\frac{\frac{2}{P} J \omega_b d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_e + T_m - T_d \quad (18)$$

이 된다.

III. 시뮬레이션 및 분석

불평형 전압이 인가된 유도전동기의 동특성을 시뮬레이션 하기위해 선정한 유도기는 정격전압 200[V], 출력 1[hp], 주파수 60[Hz], 그리고 극수 4극의 성형결선된 농형 유도기이다(Ong, 1998). 이 유도기의 정수는 $r_s=3.35[\Omega]$, $r'_r=1.99[\Omega]$, $L_{ls}=L'_{lr}=6.94[\text{mH}]$, $L_m=163.73[\text{mH}]$, 그리고 $J=0.1[\text{kgm}^2]$ 이다.

이 값들을 가지고 기초방정식에서 dq 정좌표계로 표시한 전압 방정식과 토오크식을 이용하여 동특성 가운데 속도와 토오크의 특성을 시뮬레이션하기 위하여 MATLAB/SIMULINK로 프로그램 한다. SIMULINK에 의한 유도전동기 시뮬레이션에서의 변수들의 흐름을 Fig. 2에 보였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서 Adams/Gear법을 사용하고 최대와 최소 step size를 각각 2×10^{-4} 와 1×10^{-2} 로 하고 허용오차는 1×10^{-7} 로 하였다.

전동기에 다양한 불평형 전압이 인가된 경우 즉, (1) 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우, (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우, (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대한 시뮬레이션 결과 토오크의 최대치와 최소치, 그리고 기동시간(t_s)을 각각 Table 1, Table 2, 그리고 Table 3에 보였다. 이때 제동토오크는 0으로 주었고 외부인가 기계적토오크는 0인 경우와 기준 토오크의 1/2인 값으로 하였다. 그리고 전압 불평형율(VUF)은 정상분 전압에 대한 역상분 전압의 비의 백분율로 정의한 IEC의 규정을 적용하였다.

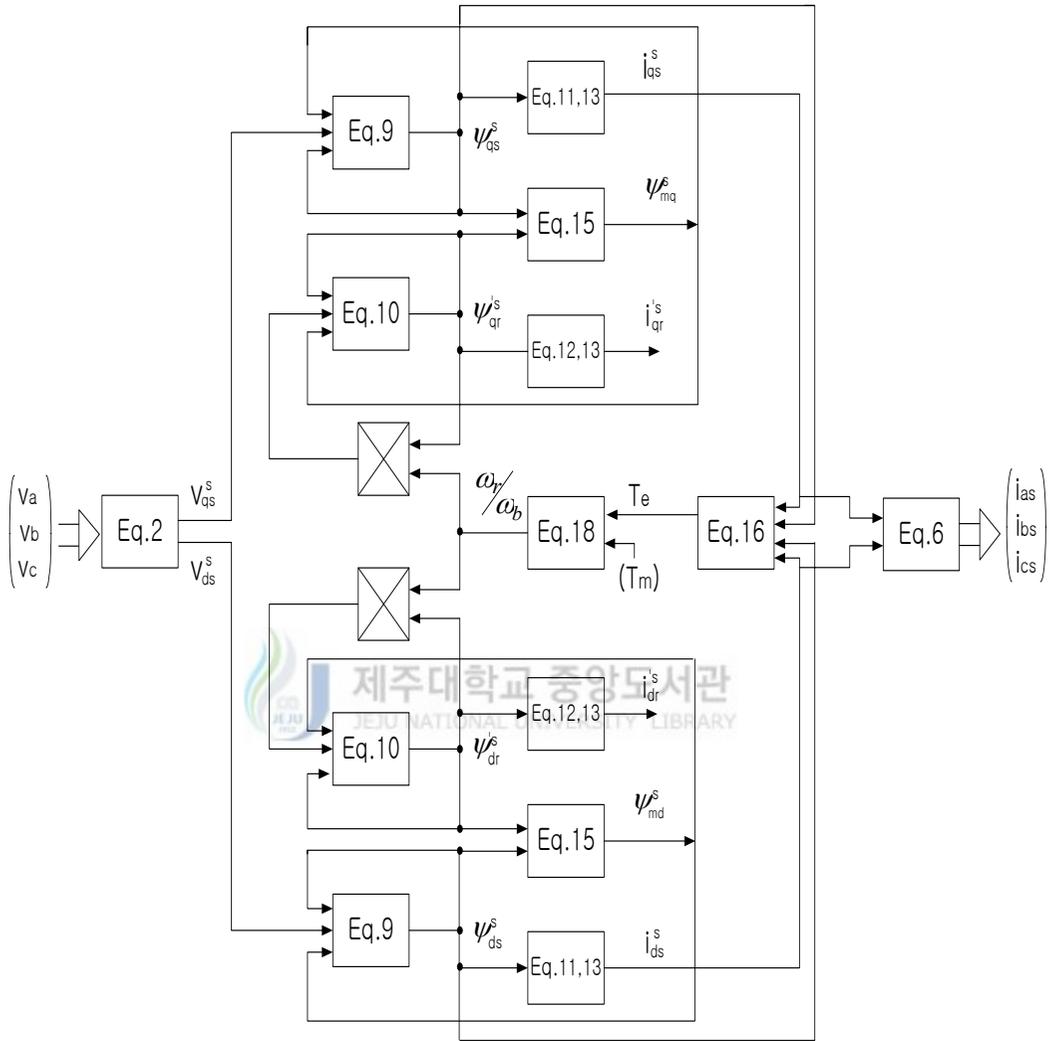
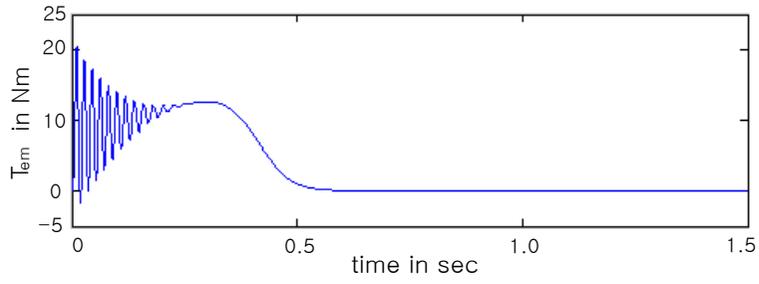
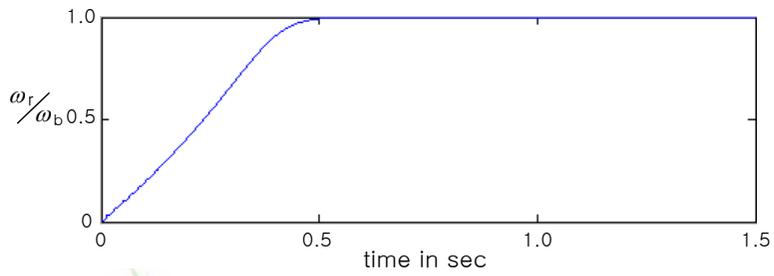


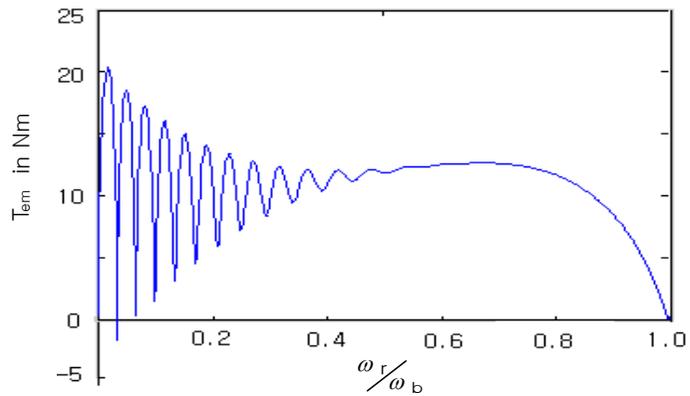
Fig. 2 Flow of variables in induction motor simulation



a) Torque vs time

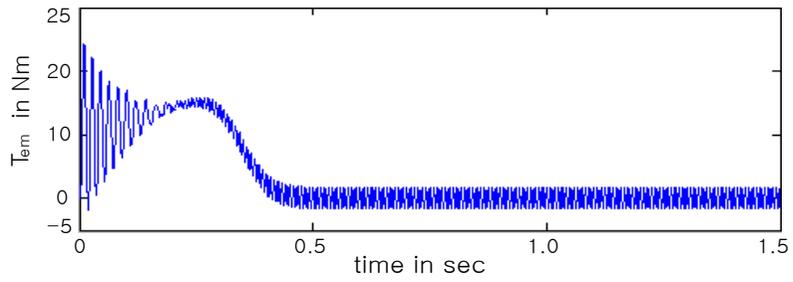


b) speed vs time

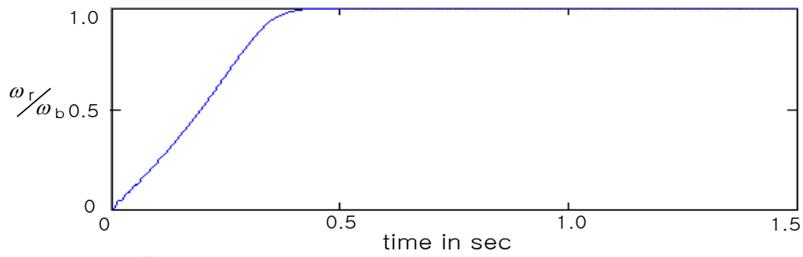


c) Torque vs speed

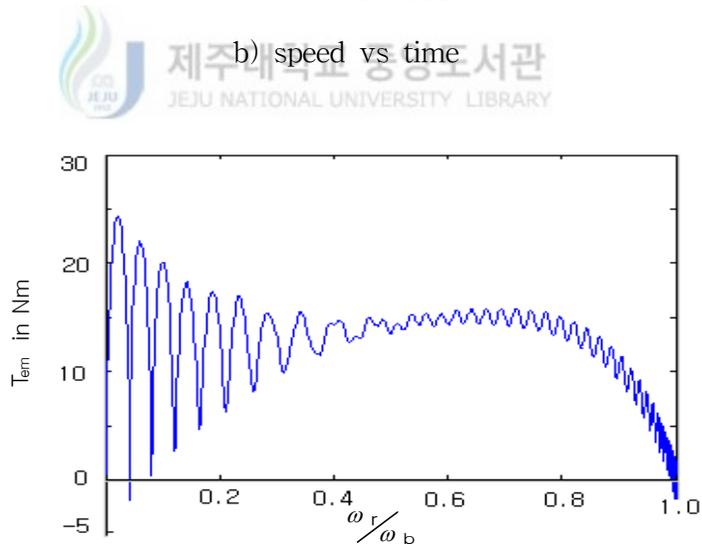
Fig. 3 Dynamic characteristics, 3 Φ -balanced case with VUF=0[%] and $T_m=0$



a) Torque vs time

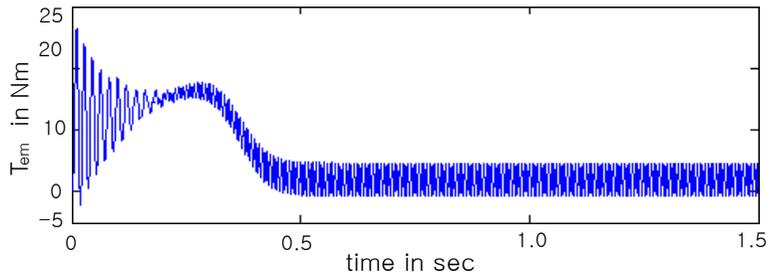


b) speed vs time

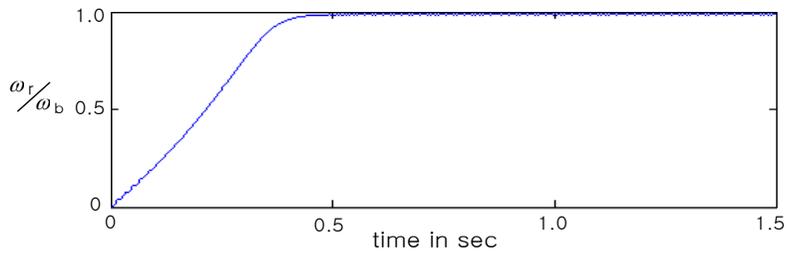


c) Torque vs speed

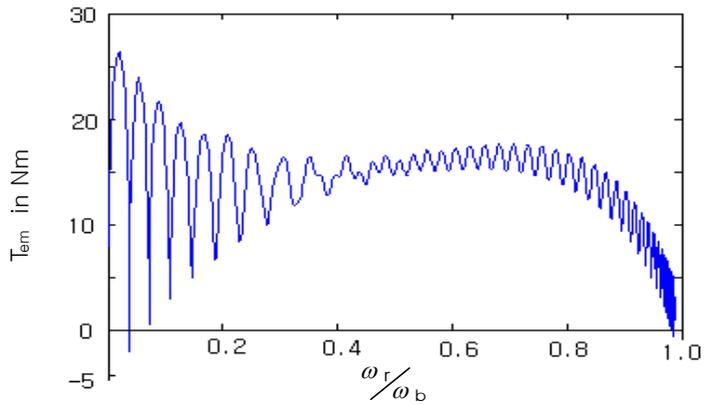
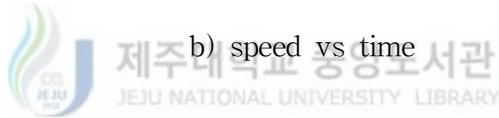
Fig. 4 Dynamic characteristics, 3 Φ -OV case with VUF=4[%] and $T_m=0$



a) Torque vs time



b) speed vs time



c) Torque vs speed

Fig. 5 Dynamic characteristics, 3 Φ -OV case with VUF=6[%] and $T_m=0$

Fig. 3은 평형 전압이 인가된 경우이고, Fig. 4와 Fig. 5는 3상 과전압의 경우에 전압 불평형율이 4[%]와 6[%]로 외부인가 기계토크가 없을 때의 속도와 토크의 특성을 보이고 있다.

Fig. 3, 4, 5에서 보듯이 평형 전압이 인가된 경우와 불평형 전압이 인가된 경우를 비교하면, 불평형율이 증가함에 따라 토크는 맥동이 커지고 있으며, 기동시간은 짧아지고 있다. 기동시간이 짧아지는 이유는 과전압이 인가되기 때문이며, 불평형율 4[%]보다도 6[%]때가 과전압정도가 더 심하기 때문에 불평형율이 커질수록 기동시간이 더 짧아지게 된다.



Table 1 Comparison of starting time and min/max torque of 8 different unvalanced voltage cases

	VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0			Tm=Tb/2		
							ts(s)	Tem(N · m)		ts(s)	Tem(N · m)	
								min	max		min	max
balanced	0	127.0∠0°	127.0∠240°	127.0∠120°	127.0	0	0.3957	-1.7108	20.3437	0.4741	-1.7474	20.3572
3Φ-UV	4	110.0∠0°	112.7∠240°	125.0∠120°	115.877	4.635	0.4739	-1.5292	16.9091	0.5935	-1.5706	16.9169
2Φ-UV	4	111.8∠0°	114.3∠240°	127.0∠120°	117.699	4.708	0.4601	-1.5937	17.4609	0.5713	-1.6238	17.4766
1Φ-UV	4	112.4∠0°	127.0∠240°	127.0∠120°	122.115	4.885	0.4280	-1.6292	18.7135	0.5223	-1.6538	18.7412
2Φ-A	4	127.0∠0°	127.0∠232.2°	127.0∠116.1°	126.789	5.092	0.3970	-1.6610	20.2568	0.4766	-1.7357	20.2747
1Φ-A	4	127.0∠0°	127.0∠240°	127.0∠113.1°	126.797	5.072	0.3975	-1.7269	20.2200	0.4772	-1.7791	20.2478
1Φ-OV	4	142.9∠0°	127.0∠240°	127.0∠120°	132.292	5.292	0.3649	-1.7755	22.0652	0.4311	-1.8560	22.0753
2Φ-OV	4	145.9∠0°	138.3∠240°	127.0∠120°	137.062	5.482	0.3406	-1.8271	23.5960	0.3975	-1.9230	23.6184
3Φ-OV	4	148.2∠0°	139.7∠240°	129.0∠120°	138.981	5.559	0.3315	-1.9019	24.3018	0.3845	-1.9805	24.3164
3Φ-UV	6	103.2∠0°	107.2∠240°	125.0∠120°	111.783	6.707	0.5104	-1.6414	15.6868	0.6506	-1.4871	15.6917
2Φ-UV	6	105.0∠0°	108.6∠240°	127.0∠120°	113.541	6.813	0.4945	-1.6977	16.2179	0.6562	-1.5226	16.2271
1Φ-UV	6	105.4∠0°	127.0∠240°	127.0∠120°	119.811	7.189	0.4450	-1.8945	18.0292	0.5482	-1.6121	18.0507
2Φ-A	6	127.0∠0°	127.0∠227.7°	127.0∠113.9°	126.515	7.591	0.3995	-2.1171	20.1058	0.4800	-1.6828	20.1193
1Φ-A	6	127.0∠0°	127.0∠240°	127.0∠109.8°	126.545	7.593	0.3997	-2.0947	20.0985	0.4803	-1.7422	20.1267
1Φ-OV	6	151.3∠0°	127.0∠240°	127.0∠120°	135.106	8.106	0.3509	-2.4081	22.9519	0.4107	-1.8965	22.9558
2Φ-OV	6	156.5∠0°	144.7∠240°	127.0∠120°	142.716	8.563	0.3148	-2.6943	25.5471	0.3622	-1.9799	25.5603
3Φ-OV	6	159.0∠0°	146.2∠240°	129.0∠120°	144.718	8.683	0.3063	-2.7593	26.3085	0.3507	-2.0430	26.3250

Table 1에서 8가지의 기호는 각각

3Φ-UV : 3상 부족전압 불평형

2Φ-UV : 2상 부족전압 불평형

1Φ-UV : 1상 부족전압 불평형

2Φ-A : 2상 각변위 불평형

1Φ-A : 1상 각변위 불평형

1Φ-OV : 1상 과전압 불평형

2Φ-OV : 2상 과전압 불평형

3Φ-OV : 3상 과전압 불평형 의 경우를 의미한다.

Table 1에서 보듯이 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우 기동시간은 부족전압 불평형인 경우는 불평형 상이 많을수록 평형전압 인가시 보다 긴시간으로 길어지며 과전압 불평형인 경우는 불평형 상이 적을수록 평형전압 인가시 보다 짧은시간으로 길어진다. 발생 토오크의 최소치도 근소한 차이로 이와같은 경향으로 커지고 있다. 발생 토오크의 최대치는 부족전압 불평형인 경우는 불평형 상이 적을수록 과전압 불평형인 경우는 불평형 상이 많을수록 커짐을 알 수 있다. 위상변위를 갖는 경우는 1상 위상변위와 2상 위상변위 모두 비슷한 기동시간과 토오크의 최소치/최대치를 보이고 있다. 전압 불평형율이 다른 경우 기동시간은 부족전압 불평형일때는 불평형율이 크면 길어지고, 과전압 불평형일때는 불평형율이 작을 때 길어지며 위상변위를 갖는 경우는 거의 같다. 모든 경우에서 외부인가 기계토오크가 있을때가 없을 때 보다 기동시간이 길어지고 최대토오크도 커지고 있음을 알 수 있다.



Table 2 Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and 1Φ-UV unbalance cases

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0			Tm = Tb/2		
						ts(s)	Tem(N · m)		ts(s)	Tem(N · m)	
							min	max		min	max
0	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	127.0	0	0.3957	-1.7108	20.3437	0.4741	-1.7474	20.3572
1	123.2 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	125.73	1.27	0.4037	-1.7237	19.9095	0.4862	-1.7697	19.9317
2	119.5 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	124.5	2.5	0.4118	-1.6804	19.5436	0.4978	-1.7408	19.5642
3	115.9 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	123.3	3.7	0.4196	-1.6733	19.1511	0.5096	-1.7275	19.1683
4	112.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	122.13	4.87	0.4208	-1.6292	18.7135	0.5223	-1.6538	18.7412
5	108.9 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	120.97	6.03	0.4367	-1.6441	18.4002	0.5349	-1.6868	18.4251
6	105.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	119.8	7.2	0.4450	-1.8945	18.0292	0.5482	-1.6121	18.0507
7	102.1 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	118.7	8.3	0.4540	-2.1645	17.6235	0.5616	-1.6343	17.6408

Table 3 Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and same positive sequence voltage cases

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vb (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0			Tm = Tb/2		
						ts(s)	Tem(N · m)		ts(s)	Tem(N · m)	
							min	max		min	max
0	127.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	127.0 ∠ 120°	127	0	0.3957	-1.7108	20.3437	0.4741	-1.7474	20.3572
1	129.2 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	124.8 ∠ 120°	127	1.27	0.3951	-1.7269	20.3534	0.4743	-1.7787	20.3683
2	131.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	122.6 ∠ 120°	127	2.54	0.3954	-1.7056	20.3475	0.4744	-1.7718	20.3635
3	133.6 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	120.4 ∠ 120°	127	3.81	0.3954	-1.6858	20.2966	0.4748	-1.7396	20.3058
4	135.8 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	118.2 ∠ 120°	127	5.08	0.3958	-1.6774	20.2912	0.4749	-1.7471	20.3086
5	138.0 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	116.0 ∠ 120°	127	6.35	0.3959	-1.7732	20.3117	0.4753	-1.7231	20.3248
6	140.2 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	113.8 ∠ 120°	127	7.62	0.3958	-2.1275	20.2469	0.4755	-1.6965	20.2628
7	142.4 ∠ 0°	127.0 ∠ 240°	111.6 ∠ 120°	127	8.9	0.3966	-2.4828	20.2652	0.4756	-1.7033	20.2772

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형을 이 다른 경우 기동시간은 1상 전압이 작아질수록 기동시간이 평형전압 인가 시 보다 긴시간으로 길어지고 발생 최대토크는 작아지고 있다. 최소토크는 불규칙하게 변동하고 있다.

Table 3은 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우로 기동시간은 평형전압 인가 시 보다 근소하게 작은시간으로 거의 변화가 없음을 알 수 있으며 최대토크도 거의 변화가 없다. 최소토크는 불규칙하게 변동하고 있다.

위의 두 경우 모두 외부인가 기계토크의 변동에 관계없이 최대토크의 값도 거의 일정함을 알 수 있다.



IV. 결 론

다양한 불평형 전압이 3상 유도전동기에 인가되었을 때의 동특성을 시뮬레이션하여 분석하였다. 이 분석을 위하여 dq 정좌표계에서의 3상 성형결선 유도전동기에 대한 전압방정식과 토오크식을 사용하였다. 시뮬레이션 도구로 MATLAB/SIMULINK를 사용하고 다양한 불평형 전압이 인가된 경우 즉, (1) 전압 불평형율은 같지만 다른 불평형 전압의 경우, (2) 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우, 그리고 (3) 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우에 대한 속도와 토오크 동특성을 시뮬레이션 하였다. 이들의 결과를 평형전압이 인가된 경우의 결과는 물론 각각의 경우에 대해서 비교하여 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 부족전압 불평형인 경우 평형전압인 경우보다 기동시간이 길어지고 최대 토오크는 작아지며 과전압 불평형인 경우는 이와 반대이다.

2) 불평형의 종류에 관계없이 정상분 전압이 클 수록 기동시간이 짧아지고 정상분 전압이 같으면 기동시간도 같아진다.

3) 정상분 전압이 클 수록 발생 최대토오크도 커진다.

4) 외부인가 기계토오크가 크면 기동시간은 더 길어지고 최대토오크는 거의 영향을 받지 않는다.

5) 위상변위는 1상이나 2상 위상변위의 경우 기동시간과 최대토오크에 거의 영향을 주지 않는다.

6) 최소토오크는 전압 불평형율이 같은 경우를 제외하고 특별한 규칙성이 없다.

참 고 문 헌

Krause, P.C. and Thomas, C.H., 1965, Simulation of Symmetrical Induction Machinery, IEEE trans. on PAS, Vol. PAS-84, No. 11, pp. 1038-1053.

Krause, P.C., 1987, Analysis of Electric Machinery, 2nd ed, McGraw-Hill.

Lee, C.Y., 1999, Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor, IEEE Trans. on EC, Vol. 14, No. 2, pp. 202-208.

Linders, J.R., 1972, Effects of Power Supply Variations on AC Motor Characteristics, IEEE Trans. on IA, Vol. IA-8, No. 4, pp. 383-400.

Ong, C.M., 1998, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR.

Williams, J.E., 1954, Operation of Three-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages, AIEE Trans., Vol. 73, pp. 125-133.

감사의 글

어느덧 대학원 생활의 끝자락에 다다르게 됐습니다. 지난 2년여의 시간을 보내면서 어느정도의 아쉬운 부분도 있지만 저에게는 소중한 경험과 지식들을 습득할 수 있었던 아주 뜻깊은 시간들로 기억될 것입니다.

대학원 생활을 하는동안 부족한 저에게 항상 버팀목이 돼 주시고 또한, 이 논문을 완성할 수 있도록 자상하게 지도해주시고 배려와 격려를 아낌없이 베풀어주신 좌종근 지도 교수님께 깊은 감사를 드리며, 그리고 저에 대해 관심을 갖고 많은 가르침을 주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김일환 교수님, 김세호 교수님, 김호찬 교수님께도 또한 감사 올립니다.

그리고 대학원 시작할 때 어리숙한 저를 이끌어준 김도진, 부창진 선배원생과 항상 웃음으로써 서로를 아껴주며 서로에게 도움이 되어온 양익준, 라경운 원생과 자기일처럼 도움을 준 문태경, 문원실 조교선생님께도 감사의 뜻을 전합니다.

마지막으로 항상 저를 위해 기도하시며 저를 있게 해주신 사랑하는 어머니님과 가족들에게 이 글을 빌어 감사한다는 말을 전하고 싶습니다.

2004년 12월

김태한 올림