

# 다양한 불평형 전압이 인가된 3상 유도전동기의 동적특성 분석

김 태 한\* · 좌 중 근\*\*

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

Tae-Han Kim\* · Chong-Keun Jwa\*\*

### ABSTRACT

The dynamic characteristics of a three phase induction motor which is applied by various unbalanced voltages are simulated and analyzed in this paper. 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/SIMULINK is used as a simulation tool. The dynamic characteristics of speed and torque are simulated for various unbalanced voltages, that is, (1) cases with the same unbalance voltage factor 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.

**Key Words** : Dynamic characteristics, Induction motor, Unbalanced voltage.

### 1. 서 론

3상 대칭 유도전동기는 평형 3상 전압으로 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 이에 따라 영향도 커진다.

이의 영향으로 출력이 감소하고 동손의 증가로 온도가 상승하는 등 전동기 운전성능이 저하하게 된다.

이의 중요성에 따라 정상상태 해석으로 Williams [1]는 역상분 전류에 의한 손실의 변화와 불평형 전압으로 인한 부가손실의 전동기 부하변화에 따른 영향 등을 분석하였다. Linders[2]는 전동기 손실과 역상분 전압사이의 상관관계가 있으며 불평형 전압이 전동기 수명단축의 원인이 되는 것을 지적하였다. Lee[3]는 전동기의 일부하 시험을 통하여 다양한 불평형 전압이 인가될 때 전동기 성능에 미치는 영향을 조사하고 관련 규정, 전동기의 감소율, 그리고 온도상승 곡선이 전압 불평형율은 물론 정상분 전압이 크기도 기초가 되어야 함을 제시하였다.

동적 해석으로 Krause와 Thomas[4]는 dq 임의 속

\* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 전기전자공학부

Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ.

도 좌표계로 표시한 대칭 유도기의 방정식을 사용하여 평형과 불평형 운전에 대한 2상과 3상 유도기의 동특성을 아날로그 컴퓨터로 시뮬레이션 하였다. Krause[5]는 고정자와 회전자 불평형 조건을 분리하여 고찰 하였고 불평형 비정현파의 전압이 고정자와 회전자에 인가될 때의 특성을 해석하였다. Ong[6]은 dq 정좌표계를 사용하여 유도기의 운전방식에 따른 동특성을 MATLAB/SIMULINK로 프로그래밍하여 시뮬레이션하였다.

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

본 논문에서는 3상 성형결선된 대칭 3상 유도전동기에 대한 기초 방정식을 dq 정좌표계로 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 대칭 유도기의 동적 시뮬레이션을 하기 위한 권선의 접속은 Fig. 1과 같다. 그림에서 보듯이 대부분의 경우 고정자와 회전자는 3선 시스템이고 농형의 경우 회전자권선은 3선 시스템과 등가로 볼 수 있으므로 4선 시스템은 고려하지 않는다.

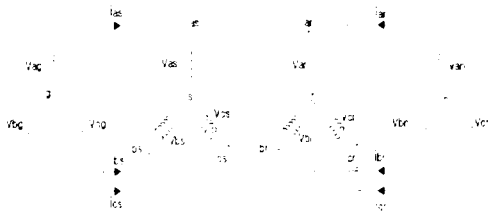


Fig. 1. Stator and rotor connection of an induction machine

이 그림에서  $V_{ag}, V_{bg}, V_{cg}$ 는 각상 고정자측 전원의 상전압을,  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$ 는 각상 고정자 권선의 상전압을,  $V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ 은 각상 회전자측 상전

압을,  $V_{ar}, V_{br}, V_{cr}$ 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 평형전압일 수도 있고 불평형전압이나 비정현파 전압일 수도 있다. 그림에서 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 0으로 하여 기초 방정식을 세운다.

고정자 전원의 상전압의 형태에 관계없이 정자 qd 좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V_{as}^s &= \frac{2}{3} V_{ag} - \frac{1}{3} V_{bg} - \frac{1}{3} V_{cg} \\ &= \frac{2}{3} V_{ag} - \frac{1}{3} V_{bg} - \frac{1}{3} V_{cg} \\ V_{as}^s &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{bg} + V_{cg}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{bg} + V_{cg}) \end{aligned} \tag{2}$$

이 되고, 여기서 위첨자 s는 정좌표계를 표시한다.

회전자 상전압을 같은 정자 qd 좌표계로 변환하기 위해서 먼저 고정자 측으로 환산된 상전압을 회전자의 a상축에 일치한 q축을 갖는 회전자 속도좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V_{ar}^r &= \frac{2}{3} V_{ar} - \frac{1}{3} V_{br} - \frac{1}{3} V_{cr} \\ &= \frac{2}{3} V_{ar} - \frac{1}{3} V_{br} - \frac{1}{3} V_{cr} \\ V_{ar}^r &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{br} + V_{cr}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (-V_{br} + V_{cr}) \end{aligned} \tag{3}$$

이 되고, 여기서  $\text{Prone}()$ 은 회전자측을 고정자로 환산된 것을, 그리고 위첨자 r은 회전자 속도좌표계를 표시한다.

다음에 정지좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} V_{qr}^s &= V_{qr}^r \cos \theta_r(t) + V_{dr}^r \sin \theta_r(t) \\ V_{dr}^s &= -V_{qr}^r \sin \theta_r(t) + V_{dr}^r \cos \theta_r(t) \end{aligned} \quad (4)$$

이 되며, 여기서

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_i(t) \quad (5)$$

이다. 여기서  $\omega_r(t)$ 는 회전자의 각 속도이다.

위에서 구한 정지좌표계의 고정자와 회전자 전압은 부하토크와 입력으로 하여 정지좌표계의 전류를 구한다. 고정자 상전류는 역변환 행렬에서  $\theta$ 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 직축 성분이며 회전자 상전류는 먼저 정지좌표계의 전류를 회전자 속도좌표계로 변환하면

$$\begin{aligned} i_{qr}^r &= i_{qr}^s \cos \theta_r(t) - i_{dr}^s \sin \theta_r(t) \\ i_{dr}^r &= i_{qr}^s \sin \theta_r(t) + i_{dr}^s \cos \theta_r(t) \end{aligned} \quad (7)$$

이 되며, 여기서  $i_{qr}^r, i_{dr}^r$ 은 각각 회전자 상전류의 횡축과 직축 성분이고 이들을 역변환 행렬에서  $\theta$ 를 0으로 하여 구하면

$$\begin{aligned} i_{ar}^r &= i_{qr}^r \\ i_{br}^r &= -\frac{1}{2} i_{qr}^r - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{dr}^r \\ i_{cr}^r &= -\frac{1}{2} i_{qr}^r + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{dr}^r \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다.

정지좌표계에서의 3상 대칭유도기의 전압방정식은

$$\begin{aligned} V_{as}^s &= r_s i_{as}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{as}^s \\ V_{ds}^s &= r_s i_{ds}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{ds}^s \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_{qr}^s &= r_r i_{qr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{dr}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{qr}^s \\ V_{dr}^s &= r_r i_{dr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \Psi_{qr}^s + \frac{p}{\omega_b} \Psi_{dr}^s \end{aligned} \quad (10)$$

으로 주어지고, 여기서  $r_s, r_r$ 은 각각 고정자와 회전자 1상당 저항을,  $\omega_b$ 는 기준 전기각속도를,  $\Psi_{qs}, \Psi_{qr}$ 은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교수의 횡축성분,  $\Psi_{ds}, \Psi_{dr}$ 은 각각 고정자와 회전자의 단위시간당 자속쇄교의 직축 성분을, 그리고  $p$ 는 시간 미분연산자  $d/dt$ 를 표시한다.

각 좌표축 성분의 자속쇄교수는

$$\begin{aligned} \Psi_{qs}^s &= x_{ls} i_{qs}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \\ \Psi_{ds}^s &= x_{ls} i_{ds}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{qr}^s &= x_{lr} i_{qr}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \\ \Psi_{dr}^s &= x_{lr} i_{dr}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \end{aligned} \quad (12)$$

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

고정자와 회전자사이의 단위시간당 상호자속 쇄교수의 횡축성분과 직축성분을  $\Psi_{mq}$ 와  $\Psi_{md}$ 이라 하면

$$\begin{aligned} \Psi_{mq} &= x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \\ \Psi_{md} &= x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다. 또한

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

이라면 식 (11), (12) 과 식 (13)로부터

$$\begin{aligned} \Psi_{mq} &= x_m \left( \frac{\Psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi_{qr}^s}{x_{lr}} \right) \\ \Psi_{md} &= x_m \left( \frac{\Psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi_{dr}^s}{x_{lr}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

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 P는 극수이다. 회전자와 운동방정식은

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

이며, 여기서 J는 회전자와 회전자와 연결된 부하의 합성 관성모멘트이고,  $\omega_{rm}$ 은 회전자의 기계 각속도이며, 그리고  $T_m$  과  $T_d$  는 각각 외부인가 기계적 토크와 제동토크이다. 이 식을  $\omega_r / \omega_b$  의 항이 포함 되도록 정리하면

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

이 된다.

### III. 시뮬레이션 및 분석

불평형 전압이 인가된 유도전동기의 동특성을 시뮬레이션 하기 위해 선정된 유도기는 정격전압 200[V], 출력 1[hp], 주파수 60[Hz], 그리고 극수 4극의 성형 결선 된 농형 유도기이다. 이 유도기의 정수는  $r_s = 3.35[\Omega]$ ,  $r_r = 1.99[\Omega]$ ,  $L_k = L_{lr} = 6.94[mH]$ ,  $L_m = 163.73[mH]$ , 그리고  $J = 0.1[kgm^2]$  이다. 이 값들을 가지고 기초방정식에서 dq 정좌표계로 표시한 전압 방정식과 토크식을 이용하여 동특성 가운데 속도와 토크 특성을 시뮬레이션하기 위하여 MATLAB/SIMULINK로 프로그램 한다.

SIMULINK에 의한 유도전동기 시뮬레이션에서의 변수들의 흐름을 Fig. 2에 보였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해서 Adams법을 사용하고 최대와 최소 step size를 각각  $2 \times 10^{-4}$  와  $1 \times 10^{-2}$ 로 하고 허용오차는  $1 \times 10^{-7}$ 로 하였다.

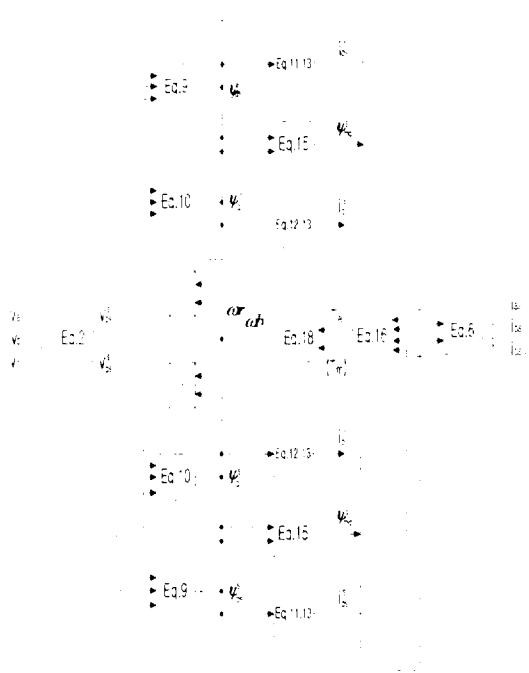
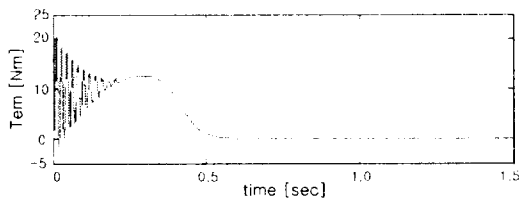
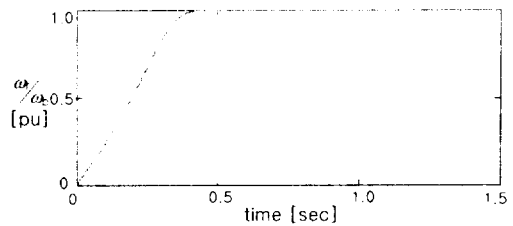


Fig. 2. Flow of variables in induction motor simulation



a) Torque vs time



b) Speed vs time

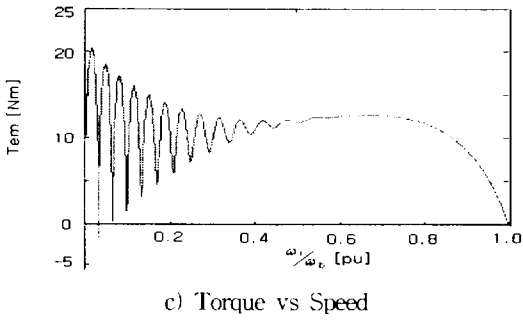


Fig. 3. Dynamic characteristics 3 $\Phi$ -balanced case with VUF=0[%] and Tm=0

Fig. 3은 Fig. 2를 바탕으로 하여 SIMULINK로 평형 3상 전압이 인가되고 기계토크가 없는 경우의 시뮬레이션 결과로 속도와 토크 특성을 보이고 있다.

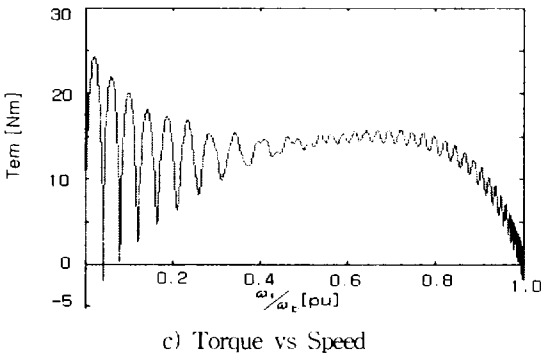
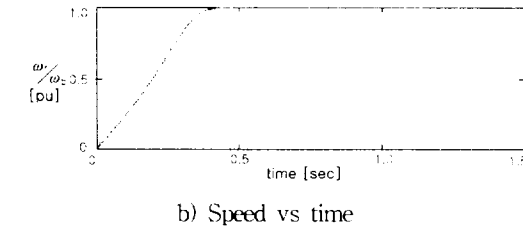
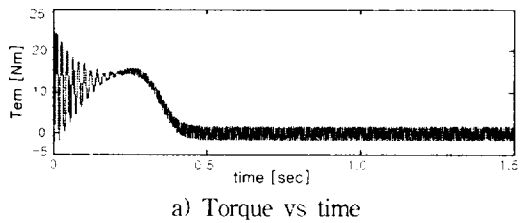
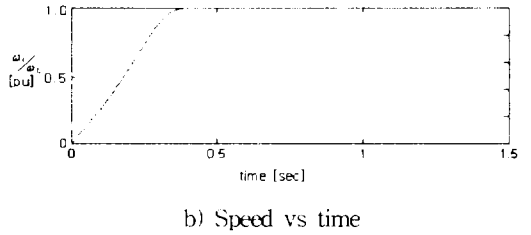
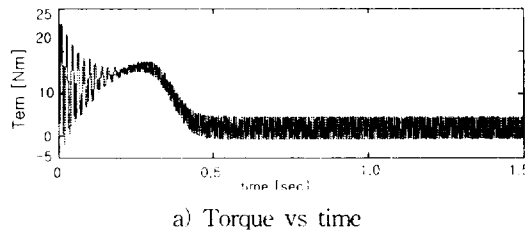


Fig. 4. Dynamic characteristics 3 $\Phi$ -OV case with VUF=4[%] and Tm=0

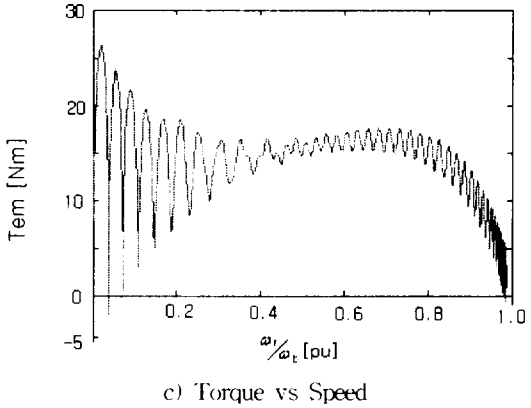


Fig. 5. Dynamic characteristics 3 $\Phi$ -OV case with VUF=6[%] and Tm=0

Fig. 4와 Fig. 5는 과전압으로 3상 불평형 전압이 인가될 때 전압불평형율이 각각 4[%]와 6[%]로 기계토크가 없을 때의 속도와 토크 특성을 나타낸다. 이들 결과로부터 과전압으로 전압 불평형이 클수록 토크 리플이 커지나 기동시간은 짧아짐을 알 수 있다.

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 토크의 최대치와 최소치, 그리고 기동시간(ts)을 각각 Table 1, Table 2.

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

	VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0			Tm = Th/2		
							ts(s)	Tem(N·m)		ts(s)	Tem(N·m)	
								min	max		min	max
balanced	0	170±0	170±0	170±0	170	0	0.867	-17108	20337	0.471	-17474	20372
3Φ-UV	4	110±0	117.7±0	150±0	115.77	466	0.479	-13292	16309	0.683	-15706	16919
2Φ-UV	4	118±0	114.3±0	150±0	117.69	1708	0.461	-15337	17309	0.673	-16238	17476
1Φ-UV	4	112.1±0	150±0	150±0	122.15	4886	0.429	-16392	18713	0.523	-16538	18742
3Φ-A	4	170±0	170±0.22	150±0.1	136.79	506	0.360	-16610	20298	0.476	-17367	20277
1Φ-A	4	170±0	170±0.20	170±0.131	136.797	5072	0.365	-17299	20200	0.472	-17791	20278
1Φ-OV	4	1429±0	150±0.20	170±0.120	132.292	5332	0.369	-17736	22062	0.411	-18660	22073
2Φ-OV	4	1459±0	138.5±0	150±0.120	137.062	5482	0.366	-18271	23390	0.375	-19220	23618
3Φ-OV	4	1481±0	139.7±0	150±0.130	138.91	5579	0.315	-19019	24308	0.345	-19865	24316
3Φ-UV	6	103.2±0	107.2±0	150±0.120	111.783	6707	0.310	-16411	15698	0.616	-14871	15697
2Φ-UV	6	105.0±0	106.6±0	150±0.120	113.541	6813	0.345	-16977	16219	0.630	-15226	16271
1Φ-UV	6	103.1±0	150±0.20	150±0.130	119.811	7189	0.430	-18935	18032	0.542	-16121	18037
3Φ-A	6	170±0	170±0.257	150±0.139	136.515	7391	0.366	-21171	20108	0.490	-18828	20119
1Φ-A	6	170±0	170±0.20	150±0.1098	136.515	7583	0.367	-20947	20086	0.483	-17422	20137
1Φ-OV	6	1513±0	170±0.20	150±0.130	135.106	8106	0.309	-23081	22959	0.407	-18965	22958
2Φ-OV	6	1561±0	143.7±0	150±0.130	142.716	8363	0.318	-20933	25547	0.322	-19789	25303
3Φ-OV	6	1591±0	146.2±0	150±0.120	144.718	8693	0.303	-27693	26305	0.307	-20430	26320

그리고 Table 3에 보였다. 이때 제동토크는 0으로 주었고 외부인가 기계적토크는 0인 경우와 기준 토크의 1/2인 값으로 하였다. 그리고 전압불평형율(VUF)은 정상분 전압에 대한 역상분 전압의 비의 백분율로 정의한 IEC의 규정을 적용하였다.

- 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 긴 시간으로 길어지며 과전압 불평형인 경우는 불평형 상이 적을수록 평형전압 인가시 보다 짧은 시간으로 길어진다.

발생 토크의 최소치도 근소한 차이로 이와 같은 경향으로 커지고 있다. 발생 토크의 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 토크의 최소치/최대치를 보이고 있다. 전압 불평형율이 다른 경우 기동시간은 부족전압 불평형일 때는 불평형율이 크면 길어지고, 과전압 불평형일 때는 불평형율이 작을 때 길어지며 위상변위를 갖는 경우는 거의 같다. 모든

Table 2. Comparison of starting time and min/max torque of different VUF and 1 $\phi$ -UV unbalance cases

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0			Tm = 1b2		
						t(s)	Tem(N·m)		t(s)	Tem(N·m)	
							min	max		min	max
0	127.0 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	127.0	0	0.867	-1.7108	20.337	0.4741	-1.7174	20.3372
1	123.2 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	125.73	1.27	0.837	-1.7237	19.9065	0.4982	-1.7097	19.9317
2	119.5 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	124.5	2.5	0.818	-1.6804	19.5336	0.4978	-1.7108	19.5642
3	115.9 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	123.3	3.7	0.8196	-1.6733	19.1511	0.5096	-1.7275	19.1683
4	112.4 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	122.13	4.87	0.8208	-1.6292	18.7135	0.5223	-1.6538	18.7412
5	108.9 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	120.97	6.03	0.8367	-1.6441	18.4002	0.5349	-1.6993	18.4251
6	105.4 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	119.8	7.2	0.8450	-1.6945	18.0292	0.5482	-1.6121	18.0307
7	102.1 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	118.7	8.3	0.8590	-2.1645	17.6235	0.5616	-1.6343	17.6408

경우에서 외부인가 기계토포크가 있을때가 없을 때보다 기동시간이 길어지고 최대토포크도 커지고 있음을 알 수 있다.

Table 2에서 알 수 있는 바와 같이 1상만 불평형 전압이고 전압 불평형율이 다른 경우 기동시간은 1상 전압이 작아질수록 기동시간이 평형전압 인가시 보다 긴시간으로 길어지고 발생 최대토포크는 작아지고 있다. 최소 토포크는 불규칙하게 변동하고 있다.

Table 3은 정상분 전압은 같지만 역상분 전압이 다른 경우로 기동시간은 평형전압 인가시 보다 근소하게 작은 시간으로 거의 변화가 없음을 알 수 있으며 최대토포크도 거의 변화가 없다. 최소토포크도 불

규칙하게 변동하고 있다.

위의 두 경우 모두 외부인가 기계토포크의 변동에 관계없이 최대토포크의 값도 거의 일정함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

다양한 불평형 전압이 3상 유도전동기에 인가되었을 때의 동특성을 시뮬레이션하여 분석하였다. 이 분석을 위하여 dq 정지좌표계에서의 3상 성형결선 유도전동기에 대한 전압방정식과 토포크식을 사용하여

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

VUF (%)	Va (V)	Vb (V)	Vc (V)	V1 (V)	V2 (V)	Tm = 0			Tm = 1b2		
						t(s)	Tem(N·m)		t(s)	Tem(N·m)	
							min	max		min	max
0	127.0 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	127.0 ± 120 <sup>o</sup>	127	0	0.867	-1.7108	20.337	0.4741	-1.7174	20.3372
1	129.2 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	124.8 ± 120 <sup>o</sup>	127	1.27	0.861	-1.7209	20.3334	0.4743	-1.7097	20.3683
2	131.4 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	123.6 ± 120 <sup>o</sup>	127	2.54	0.864	-1.7056	20.3477	0.4744	-1.7118	20.3635
3	133.6 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	120.4 ± 120 <sup>o</sup>	127	3.81	0.864	-1.6838	20.2906	0.4748	-1.7096	20.3058
4	135.8 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	118.2 ± 120 <sup>o</sup>	127	5.08	0.868	-1.6774	20.2912	0.4749	-1.7171	20.3066
5	138.0 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	116.0 ± 120 <sup>o</sup>	127	6.35	0.869	-1.7732	20.4117	0.4733	-1.7231	20.3248
6	140.2 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	113.8 ± 120 <sup>o</sup>	127	7.62	0.868	-2.1275	20.2469	0.4735	-1.6965	20.2628
7	142.4 ± 0 <sup>o</sup>	127.0 ± 240 <sup>o</sup>	111.6 ± 120 <sup>o</sup>	127	8.9	0.866	-2.3828	20.2572	0.4736	-1.7033	20.2772

다. 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 최대토오크도 커지며 과전압 불평형인 경우는 이와 반대이다.
- 2) 불평형의 종류에 관계없이 정상분 전압이 클 수록 기동시간이 길어지고 정상분 전압이 같으면 기동 시간도 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.

### 참고문헌

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

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

[3] C.Y. Lee, 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.

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

-1053.

[5] P.C. Krause, 1987, Analysis of Electric Machinery, 2nd ed, McGraw-Hill Book co.

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